

**INSTITUTO ENSINAR BRASIL  
FACULDADE DOCTUM DE JOÃO MONLEVADE**

**Márlon Breno Trindade Oliveira**

**Marcelo Moreira dos Santos**

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO USO DE RASTREADOR SOLAR EM UM  
SISTEMA FOTOVOLTAICO REAL LOCALIZADO NA CIDADE DE ALVINÓPOLIS  
(MG).**

**JOÃO MONLEVADE**

**2019**

**INSTITUTO ENSINAR BRASIL**  
**FACULDADE DOCTUM DE JOÃO MONLEVADE**

**Márlon Breno Trindade Oliveira**

**Marcelo Moreira dos Santos**

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO USO DE RASTREADOR SOLAR EM UM  
SISTEMA FOTOVOLTAICO REAL LOCALIZADO NA CIDADE DE ALVINÓPOLIS  
(MG).**

**Trabalho de Conclusão de curso  
apresentado ao Curso de Engenharia  
Elétrica da Faculdade Doctum de João  
Monlevade, como requisito para  
obtenção do título de bacharel em  
engenharia elétrica, orientado pela  
Professora Dr.<sup>a</sup> Thaís de Fátima Araújo  
Silva.**

**JOÃO MONLEVADE**

**2019**

rede de ensino  
**DOCTUM**

**FACULDADE DOCTUM DE JOÃO MONLEVADE**

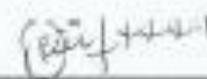
**FOLHA DE APROVAÇÃO**

O Trabalho de Conclusão de Curso intitulado: AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO USO DE RASTREADOR SOLAR EM UM SISTEMA FOTOVOLTAICO REAL LOCALIZADO NA CIDADE DE ALVINÓPOLIS (MG), elaborado pelo aluno MARCELO MOREIRA DOS SANTOS foi aprovado por todos os membros da Banca Examinadora e aceito pelo curso de Engenharia Elétrica da Faculdade Doctum de João Monlevade, como requisito parcial da obtenção do título de Bacharel.

**BACHAREL EM ENGENHARIA ELÉTRICA.**

João Monlevade, 08 de Julho de 2019

  
Prof.ª Dr.ª Thaís de Fátima Araújo Silva

  
Prof. José Olímpio dos Santos Filho

  
Prof. Hernani Oliveira Santiago Filho

## RESUMO

A busca por novas fontes na produção de energia elétrica atualmente é de muita importância devido ao crescimento exponencial do seu consumo em todo o mundo. Uma das formas alternativas e de muito potencial principalmente no território brasileiro é a energia fotovoltaica, que é a conversão da energia radiada pelo sol em eletricidade. Neste trabalho foram realizados um estudo bibliográfico sobre as principais características funcionais desse modelo de geração e um estudo de caso visando analisar a viabilidade financeira da utilização de rastreadores solares para otimização da eficiência de uma planta real, localizada na cidade de Alvinópolis-MG construída para suprir um consumo anual de 13.000KWh e composta por 40 módulos fotovoltaicos policristalinos de 265Wp. Para realização da coleta de dados do período de 12 de abril de 2019 à 28 de abril desse mesmo ano, os autores efetuaram uma modificação estrutural na usina fotovoltaica para individualizar o sistema em dois grupos de 20 módulos, que possuem mesma potência e fabricante. Um grupo de módulos foi posicionado fixo no ponto de máxima radiação, definida pela posição geográfica e o outro conjunto, conectado ao seguidor solar. Os resultados obtidos nesse estudo através do uso dos métodos de viabilidade financeira: payback descontado, VPL e TIR apontam que a utilização do rastreador solar é uma forma de implementação viável em sistemas fotovoltaicos, aumentando a produtividade do sistema em 20,96%, beneficiando na redução do período do retorno do investimento inicial.

**Palavras-chave:** Rastreador Solar. Análise de Viabilidade. Eficiência em usina Fotovoltaica.

## ABSTRACT

The search for new sources in the production of electric energy today is of great importance due to the exponential growth of its consumption around the world. One of the alternative and very potential forms, mainly in Brazil, is photovoltaic energy, which is the conversion of energy radiated by the sun into electricity. In this work a bibliographic study was carried out on the main functional characteristics of this generation model and a case study to analyze the financial viability of the use of solar trackers to optimize the efficiency of a real plant located in the city of Alvinópolis-MG built to supply an annual consumption of 13,000KWh and composed of 40 polycrystalline photovoltaic modules of 265Wp. To perform the data collection, carried out between April 12, 2019 and April 28 of that same year, the authors made a structural modification in the photovoltaic plant to individualize the system in two groups of 20 photovoltaic modules of the same power and manufacturers. A group of modules was positioned fixed at the point of maximum radiation, defined by the geographic position and the other set, connected to the solar tracker. The results obtained in this study through the use of financial viability methods: discounted payback, NPV and IRR indicate that the use of the solar tracker is a viable implementation method in photovoltaic systems, increasing the system productivity by 20.96% and providing the reduction of the period of return on the initial investment.

**Key-words:** Solar tracker. Feasibility analysis. Efficiency in photovoltaic power plant.

## SIGLAS E ABREVIATURAS

BEN – Balanço Energético Nacional

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Contínua

CDI – Certificado de Depósito Interbancário

CLP – Controlador Lógico Programável

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais

CSV – Comma Separated Values “Valores separados por vírgula”

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

EPR – Etileno Propileno

FV – Fotovoltaico

ICC – Corrente de Curto Circuito

Imp – Corrente de Máximo Ponto de Potência

IPC – Índices de Preços nos Consumidores

NP – Números de caminhos paralelos

NS – Números de caminhos série

Pmáx – Ponto Máximo

PMP – Ponto de Máxima Potência

TIR – Taxa interna de Retorno

UFV – Usina Fotovoltaica

VCA – Tensão em Corrente Alternada

Vmp – Tensão de máximo ponto de potência

VOC – Tensão de Circuito Aberto

VPL – Valor Presente Líquido

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte .....	17
Figura 2 - Percurso da luz solar na atmosfera.....	19
Figura 3 - Distribuição da radiação solar que chega à superfície terrestre, expressa em kcal/(cm <sup>2</sup> /ano).....	19
Figura 4 - Ângulos da posição solar .....	20
Figura 5 - Posicionamento solar nas estações do ano.....	21
Figura 6 - Sistema isolado (off-grid) .....	22
Figura 7 - Curva característica de uma célula fotovoltaica.....	23
Figura 8 - Seguidor Solar .....	24
Figura 9 - Gráfico da comparação da energia entre um sistema fixo e um sistema de dois eixos .....	24
Figura 10 - Seguidor Passivo .....	26
Figura 11 - Exemplo de um seguidor solar ativo e seus componentes .....	27
Figura 12 - Detector por placa opaca .....	28
Figura 13 - Detector por montagem inclinada de sensores.....	29
Figura 14 - Detector por colimação com lente amplificadora .....	29
Figura 15 - Seguidor de Eixo Único.....	31
Figura 16 - Seguidor de dois eixos.....	32
Figura 17 - Rastreador solar com estrutura tipo pedestal (Seguidor vertical ou de Azimute) .....	33
Figura 18 - Rastreador solar do tipo <i>roll-tilt</i> – Seguidor de Eixo Horizontal .....	34
Figura 19 - Sistema de eixo horizontal com 4 módulos.....	34
Figura 20 - Rastreador solar com plataforma giratória (Rotativa de dois eixos).....	35
Figura 21 - Comparação da estimativa da energia produzida de um sistema de 1 kWp usando vários modelos de seguidores.....	37
Figura 22 - Características do módulo fotovoltaico empregado na planta de geração fotovoltaica em análise.....	40
Figura 23 - Dados das características do inversor Fronius PRIMO 5.0-1 .....	41
Figura 24 - Ligação dos módulos fotovoltaicos do sistema .....	43
Figura 25 - Média de Radiação na cidade de Alvinópolis-MG.....	45
Figura 26 - Conjunto de módulos da usina.....	46

Figura 27 - Quadro de Carga e Comando do Rastreador .....	47
Figura 28 - Estrutura do Rastreador Solar .....	48
Figura 29 - Unidade Hidráulica .....	48
Figura 30 - Cilindro hidráulico montado com articulação rotulada da haste .....	49
Figura 31 - Válvulas Direcionais.....	51
Figura 32 - Válvulas reguladoras de fluxo .....	51
Figura 33 - Imagem interna do Inversor fotovoltaico no momento da reconfiguração .....	53
Figura 34 - Valor tarifado na instalação pela concessionária CEMIG .....	61
Figura 35 - Inflação histórica Brasil (IPC) – por ano .....	65
Figura 36 - Histórico de reajustes da CEMIG .....	65

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela com informações processadas com valores de energia.....	54
Tabela 2 - Tabela criada para comparação entre os sistemas.....	54
Tabela 3 - Estratificação do Investimento do Sistema Fotovoltaico .....	57
Tabela 4 - Estratificação do custo inicial do Rastreador Solar .....	58
Tabela 5 - Demonstração do cálculo da taxa mínima de atratividade .....	60
Tabela 6 - Relação do tempo de atuação dos componentes do rastreador solar .....	60
Tabela 7 - Relação das potências dos equipamentos do rastreador solar .....	61
Tabela 8 - Estratificação do cálculo do consumo de energia do seguidor solar .....	61
Tabela 9 - Cálculo da depreciação do sistema fotovoltaico com rastreador .....	63
Tabela 10 - Cálculo da depreciação anual do sistema fotovoltaico fixo .....	63
Tabela 11 - Custos com manutenção do sistema fotovoltaico com rastreador .....	64
Tabela 12 - Custos de manutenção do sistema fotovoltaico com módulos fixos.....	64
Tabela 13 - Demonstrativo do cálculo da taxa de reajuste anual .....	66
Tabela 14 - Estratificação do fluxo de caixa dos dois primeiros anos do projeto do sistema fotovoltaico com rastreador solar .....	67
Tabela 15 - Estratificação do fluxo de caixa dos dois primeiros anos do projeto do sistema fotovoltaico.....	67
Tabela 16 - Cálculo da Viabilidade do Sistema FV conectado ao rastreador.....	70
Tabela 17 - Cálculo da Viabilidade do Sistema FV com estrutura fixa .....	70
Tabela 18 - Cálculo da Viabilidade do Sistema conectado ao Rastreador (Método da Taxa Interna de Retorno (TIR)) .....	71
Tabela 19 - Cálculo da Viabilidade do Sistema fotovoltaico fixo (Método da Taxa Interna de Retorno (TIR)) .....	72

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Comparação da energia gerada entre o sistema fotovoltaico fixo e o sistema conectado ao rastreador .....	55
Gráfico 2 – Representação percentual dos componentes a unidade geradora.....	57
Gráfico 3 - Percentual representativo dos componentes no investimento do projeto do rastreador solar .....	58
Gráfico 4 - Rendimento dos módulos fotovoltaicos utilizados na unidade geradora fotovoltaica .....	62
Gráfico 5 - Demonstrativo do retorno do investimento para o sistema fotovoltaico conectado ao rastreador solar.....	68
Gráfico 6 - Demonstrativo do retorno do investimento para o sistema fotovoltaico com estrutura fixa.....	68

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
<b>2 OBJETIVOS.....</b>	<b>15</b>
<b>2.1 Objetivo Geral.....</b>	<b>15</b>
<b>2.2 Objetivos Específicos.....</b>	<b>15</b>
<b>3 MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>16</b>
<b>3.1 Energia Solar.....</b>	<b>16</b>
<b>3.2 Energia Solar no Brasil.....</b>	<b>16</b>
<b>3.3 Radiação solar.....</b>	<b>17</b>
<i>3.3.1 Posicionamento Solar.....</i>	<i>20</i>
<b>3.4 Tipos de sistemas fotovoltaicos.....</b>	<b>21</b>
<b>3.5 Rastreamento Solar.....</b>	<b>23</b>
<i>3.5.1 Rastreadores Passivos.....</i>	<i>25</i>
<i>3.5.2 Rastreadores ativos.....</i>	<i>26</i>
<b>3.6 Classificação dos Rastreadores Solares.....</b>	<b>30</b>
<i>3.6.1 Classificação dos rastreadores solares quanto ao número de eixos rotativos. 30</i>	
<i>3.6.1.1 Seguidor Polar de Eixo Único.....</i>	<i>30</i>
<i>3.6.1.2 Seguidor Solar de dois Eixos.....</i>	<i>31</i>
<i>3.6.2 Classificação dos rastreadores solares quanto ao tipo de Estrutura.....</i>	<i>32</i>
<i>3.6.2.1 Estrutura com Pedestal – Seguidor de Eixo Vertical ou de Azimute.....</i>	<i>32</i>
<i>3.6.2.2 Estrutura com Roll-Tilt – Seguidor de Eixo Horizontal.....</i>	<i>33</i>
<i>3.6.2.3 Estrutura com Plataforma Giratória – Seguidor de plataforma rotativa de dois eixos.....</i>	<i>35</i>
<b>3.7 Rastreamento de máxima potência para sistemas fotovoltaicos.....</b>	<b>36</b>
<b>3.8 Comparação entre sistemas rastreadores.....</b>	<b>36</b>
<b>4 METODOLOGIA.....</b>	<b>38</b>
<b>4.1 Abordagem de Pesquisa.....</b>	<b>38</b>
<b>4.1 Método da Pesquisa.....</b>	<b>38</b>
<b>5 ESTUDO DE CASO.....</b>	<b>39</b>
<b>5.1 Característica do empreendimento em estudo.....</b>	<b>39</b>
<b>5.2 Características dos equipamentos principais empregados no Gerador.....</b>	<b>40</b>
<i>5.2.1 Características dos dispositivos de proteção.....</i>	<i>41</i>
<b>5.3 Infraestrutura do sistema elétrico de abastecimento de energia.....</b>	<b>42</b>
<b>5.4 Configuração de ligação da Usina Fotovoltaica.....</b>	<b>43</b>

<b>5.5 Recursos solar e condições climáticas da região.....</b>	<b>44</b>
<b>5.6 Modelo do rastreador solar estudado.....</b>	<b>45</b>
<b>5.7 Programação dos tempos.....</b>	<b>49</b>
<b>5.8 Alteração do sistema rastreador para realização da coleta dos dados.....</b>	<b>50</b>
<b>5.9 Coleta dos dados.....</b>	<b>52</b>
<b>5.10 Processamento dos Dados coletados.....</b>	<b>53</b>
<b>5.11 Comparação da eficiência do sistema conectado ao rastreador solar e o sistema fixo.....</b>	<b>54</b>
<b>6 ANÁLISE DE VIABILIDADE DO SISTEMA FOTOVOLTAICO.....</b>	<b>56</b>
<b>6.1 Premissas para o cálculo de viabilidade.....</b>	<b>56</b>
<i>6.1.1 Investimento inicial.....</i>	<i>57</i>
<i>6.1.2 Taxa mínima de atratividade.....</i>	<i>59</i>
<i>6.1.3 Consumo de energia do sistema seguidor solar.....</i>	<i>60</i>
<i>6.1.4 Perdas da eficiência dos módulos fotovoltaicos utilizados no projeto.....</i>	<i>62</i>
<i>6.1.5 Cálculo da depreciação da unidade geradora.....</i>	<i>62</i>
<i>6.1.6 Custos com manutenções.....</i>	<i>64</i>
<i>6.1.7 Outras taxas consideradas na análise de viabilidade.....</i>	<i>64</i>
<b>6.2 Análise de investimento utilizando o método payback descontado.....</b>	<b>66</b>
<b>6.3 Análise de Investimento utilizando o método do valor presente líquido.....</b>	<b>69</b>
<b>6.4 Análise de Investimento utilizando o método da taxa interna de retorno ....</b>	<b>70</b>
<b>7 CONCLUSÃO .....</b>	<b>73</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>75</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>79</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A modernização da sociedade, associada à grande expansão do setor industrial nos últimos anos, vem acarretando uma crescente elevação da utilização de equipamentos elétricos e eletrônicos em todo mundo, conseqüentemente aumentando consideravelmente a demanda de energia elétrica. Contudo, esse ritmo acelerado, não foi acompanhado devidamente pelo setor de geração. Vários países, inclusive o Brasil, tiveram problemas de disponibilidade de energia, esse fato os levou a incentivar o uso de novos métodos de geração, principalmente utilizando fontes renováveis.

No Brasil, o incentivo a utilização de fontes renováveis na geração de energia elétrica, veio com a divulgação da Resolução Normativa 482 pela ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica no ano de 2012, criada com a proposta de estabelecer condições gerais para o acesso da geração distribuída à rede da concessionária local, concedendo ao consumidor o direito de produzir sua própria energia e disponibilizar o seu excedente.

A Resolução Normativa 482/2012 também foi importante para estabelecer critérios de compensação, propiciando a esses produtores serem ressarcidos pela energia injetada na rede da concessionária local no mês em que seu sistema de geração foi insuficiente para compensar seu consumo (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2017).

Diante desses fatores, as fontes de energia renováveis passaram a ganhar destaque, não apenas pelo aspecto econômico, mas também para diminuir a dependência das fontes fósseis não renováveis causadores de grandes impactos ambientais na sua utilização no planeta.

No território brasileiro, a energia solar é uma fonte de grande potencial, visto que o sol é presente em abundância em todo o território. Sendo que, a região Nordeste, por estar mais próxima a linha do Equador, é a que possui maior área de radiação solar e também onde ela é mais eficaz.

Para se ter uma ideia melhor dessa eficiência solar brasileira, fazendo uma comparação do Brasil com a Alemanha, que é o país onde a tecnologia solar fotovoltaica é a mais utilizada no mundo. No país germânico, a insolação média diária varia de 2,5 a 3,5 horas por dia. No Brasil a média de insolação diária é de aproximadamente de 6 a 4 horas, portanto, a melhor região da Alemanha em termos

solares, recebe menos energia que a região menos privilegiada do Brasil (CABRAL et al. 2013).

O grande empecilho enfrentado no Brasil para maior adesão ao sistema de geração fotovoltaico está relacionado no alto valor de investimentos aplicado para sua implantação. O investimento é elevado se comparado a outras fontes de energia, e a produção pode ser comprometida pelo clima, diminuindo a sua produtividade em dias nublados ou chuvosos. Além disso, outro fator que propicia o aumento do custo desse sistema é a baixa eficiência dos painéis solares que é um equipamento formado por semicondutores feitos de silício responsáveis pela conversão da luz solar em eletricidade.

Atualmente, os painéis comercialmente mais eficientes são os painéis de silício monocristalinos, eles possuem silício de alta pureza e sua eficiência varia em torno de 15 a 22%, porém quanto maior a tecnologia empregada, maior valor financeiro é demandado para sua aquisição, inviabilizando-os em grande parte dos projetos (PORTAL SOLAR, 2013). Sendo assim, atualmente o painel mais vendido é o de silício policristalino, que apresenta eficiência em torno de 13 a 16%.

Os níveis de eficiência dos painéis solares disponíveis no mercado avançam a pequenos passos. Diante disso, com objetivo de melhorar o desempenho de sistemas que utilizam o sol como fonte de geração, um método atualmente muito estudado, é a implantação de sistemas com rastreadores solares. Esses sistemas aumentam a exposição direta dos raios provenientes do sol sobre os módulos fotovoltaicos, garantindo um possível ganho na produção de energia.

Devido ao pequeno número de sistemas fotovoltaicos com rastreadores solares no Brasil, os estudos acadêmicos baseiam as verificações de desempenho com a utilização de protótipos. Apesar do uso dos protótipos garantirem uma verificação de eficiência confiável, eles são imprecisos para análise de viabilidade, pois são desenvolvidos com estruturas frágeis incapazes de suportarem intempéries ambientais presentes em uma condição real, além de ser impossível a contabilização do custo de operação, uma vez que os equipamentos empregados possuem um consumo de energia para operação muito inferior que um sistema real necessita.

Neste contexto, esse trabalho pretende fazer uma revisão bibliográfica sobre os principais tipos de rastreadores solares. Além disso pretende-se realizar uma análise de viabilidade do seu uso para otimização de uma planta fotovoltaica real, propondo contribuir para a comunidade acadêmica na obtenção de dados mais

realísticos possíveis, podendo servir também como material de referência para possíveis investidores que necessitam de informações concretas e experiências com o uso dessa tecnologia de geração, auxiliando-os através dos resultados, a uma melhor tomada de decisões na aplicabilidade financeira.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Esse presente trabalho tem o objetivo geral de fazer um levantamento bibliográfico sobre sistemas de gerações fotovoltaicas com rastreadores de irradiação e apresentar a análise de eficiência e viabilidade de uma planta fotovoltaica real que utiliza um seguidor de radiação.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Avaliar as características funcionais de uma usina de geração de energia elétrica fotovoltaica com rastreador solar;
- Avaliar necessidade da utilização de sistemas para rotação dos módulos em função do ângulo de incidência da radiação;
- Mensurar e comparar a viabilidade e o desempenho de geração de energia elétrica de um sistema estático e de um sistema com rastreador solar, utilizando método Payback Descontado, VPL e TIR.

### **3 MARCO TEÓRICO**

#### **3.1 Energia Solar**

A energia solar origina-se da luz e do calor do Sol. Ela pode ser utilizada por diversos tipos de tecnologia, como, o aquecimento solar, energia solar fotovoltaica (à qual é o foco do trabalho), a energia heliotérmica, a arquitetura solar e a fotossíntese artificial. A superfície terrestre, os oceanos e a atmosfera absorvem energia solar, levando a um aumento de temperatura.

Segundo Pinto (2015), no movimento de translação da Terra em volta do Sol, a Terra recebe cerca de  $1410 \text{ W/m}^2$  de energia solar. Mas, dessa quantidade, apenas 19% é absorvida pela atmosfera terrestre e 35% é refletido pelas nuvens. A energia entregue na atmosfera é composta por luz visível e luz ultravioleta, onde é utilizada pelas plantas para realizar a fotossíntese. Apenas uma pequena parte de energia solar disponível é utilizada.

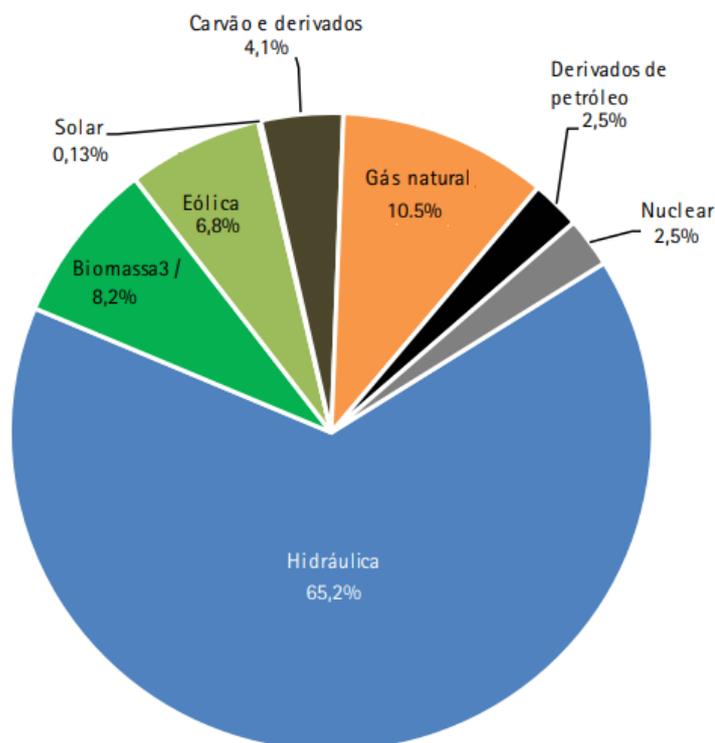
#### **3.2 Energia Solar no Brasil**

O constante aumento da demanda de energia elétrica no mundo, assim como o aquecimento global e a redução das emissões de gases do efeito estufa, são assuntos muito debatidos entre as nações atualmente.

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o Balanço Energético Nacional (BEN) ano base 2017, o mais atual publicado, diz que “a geração de energia elétrica no Brasil em centrais de serviço público e autoprodutores atingiu 588,0TWh, resultado 1,6% superior ao de 2016” (EPE, 2018).

O Brasil possui uma matriz elétrica de origem predominantemente renovável, como pode ser visto na Figura 1, com destaque para a geração hidráulica, que contribui com 65,2% da oferta interna, tem-se também, a eólica (6,8%), biomassa (8,2%) e a solar (com apenas 0,13%). Em contrapartida, a geração elétrica a partir de fontes não renováveis representa 19,6% do total nacional, um valor considerável (EPE, 2018).

Figura 1 - Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte



Fonte: EPE (2018)

Os impactos ambientais causados pelos combustíveis fósseis e o alto valor das usinas nucleares, faz com que a energia solar tenha certo destaque como opção de suprir o aumento da energia demandada.

### 3.3 Radiação solar

A energia produzida pelo sol passa por todo o espaço e chega até a Terra na forma de radiação eletromagnética que é constituída de ondas com comprimentos e frequências diversas.

A energia que uma onda pode transmitir está associada à frequência, ou seja, quanto maior a frequência, maior a energia emitida. Já o comprimento é inversamente proporcional a frequência, quanto menor a frequência, maior é o seu comprimento.

A radiação eletromagnética do Sol é convertida em eletricidade na célula fotovoltaica, devido seu tamanho reduzido, uma célula fotovoltaica não é capaz de produzir eletricidade em alta potência. Para que consiga um valor de potência mais elevada os fabricantes fazem uma associação de várias células, denominando esse grupo de células de módulos fotovoltaicos (CASTRO, 2002).

A atmosfera permite a passagem de certos comprimentos de onda e reflete ou retém outros. Na parte mais alta da atmosfera, encontra-se a camada de ozônio, que consegue absorver uma pequena porcentagem de radiação total, chamada de radiação ultravioleta, muito nociva aos seres vivos. Uma parte da radiação é refletida para o espaço e a outra é absorvida pelos gases responsáveis pelo efeito estufa (gás carbônico, metano e outros).

Segundo Castro (2002), existem dois fatores principais que impedem que a Terra absorva boa parte da energia advinda do sol: primeiro, a distância em relação ao sol (em torno de  $1,495 \times 10^{11}$ m) e por último, a rotação da Terra sobre seu eixo polar, o que permite a entrada de energia parcialmente durante os dias.

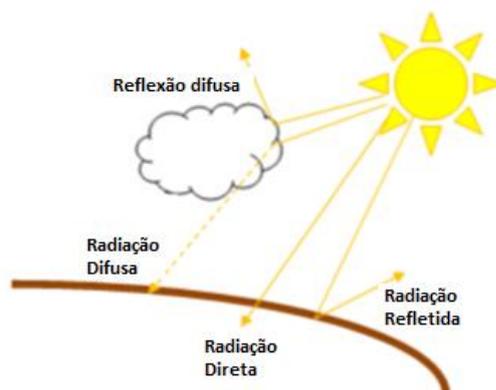
Ao atravessar a atmosfera da Terra, a radiação pode ser absorvida, refletida, dispersada ou transmitida diretamente. Já a irradiação, é definida como: direta, difusa e total.

De acordo com Anjos (2014, p.1), “a diferença entre radiação e irradiação é bem simples: radiação é transmissão de energia através do espaço, já irradiação é exposição à radiação”. O Sol emite radiação, e quando um objeto que emite radiação está fora do corpo do indivíduo, tem-se a exposição à radiação solar. A radiação, é a propagação ou condução do calor com uma determinada velocidade, é aquilo que irradia, ou seja, saem de raios, e esses raios advém de algum lugar. A diferença entre radiação e a luz é a frequência com que ocorre a radiação nos corpos. A luz que pode ser vista é a propagação do calor. Já a irradiação é a propagação de energia (calor) sem que necessite de um meio material para que isso ocorra.

A irradiação direta é a fração da radiação solar que não sofre qualquer alteração em sua direção inicial são os raios solares que vêm diretamente do sol. A irradiação difusa, é aquela que se espalha ao passar pelos gases atmosféricos, além de nuvens e poeira, parece vir em todas as direções. E a irradiação total, é o somatório da direta com a difusa. Normalmente, em dias sem nuvens, céu “limpo”, 80 a 90% da irradiação solar é direta. A irradiação total é uma componente muito importante para projetos de sistemas de energia solar de temperaturas altas, porque esta pode ser concentrada em pequenas áreas (como espelhos ou lentes) o que não acontece com a componente difusa (BARBOSA, 2010).

A Figura 2, mostra de forma simples o percurso da luz solar na atmosfera.

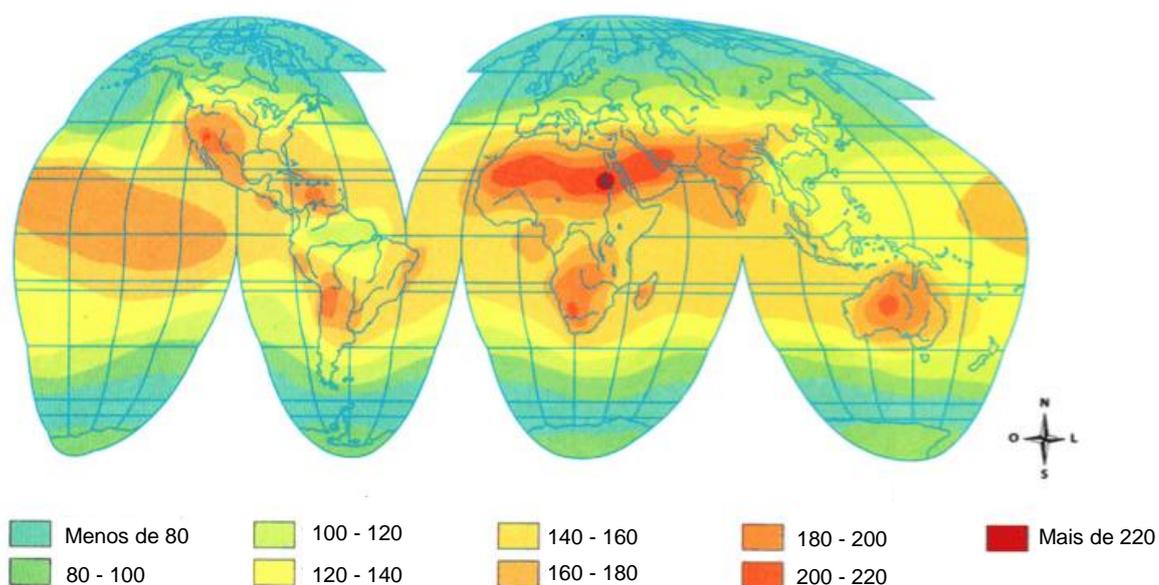
Figura 2 - Percurso da luz solar na atmosfera



Fonte: Neto e Silva (2010)

Logo, nem todos os locais das superfícies terrestres recebem a mesma quantidade de radiação solar, a posição e os movimentos da Terra fazem, por exemplo, que regiões próximas ao Equador receba mais energia do que os polos, e que no verão tenha-se maior energia solar do que no inverno. A Figura 3 apresenta o mapa mostrando a distribuição da radiação solar pelo mundo.

Figura 3 - Distribuição da radiação solar que chega à superfície terrestre, expressa em kcal/(cm<sup>2</sup>/ano)



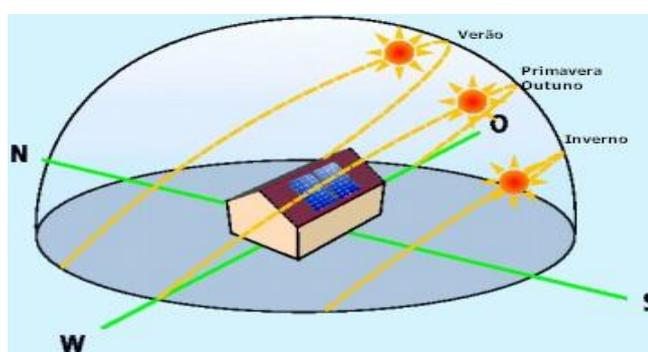
Fonte: Electronica (2014)



em relação ao sol, acarretando alteração da sua altura face ao plano horizontal, originando às estações do ano.

No caso do Brasil localizado no Hemisfério Sul, para ter uma melhor eficiência do sistema de geração, os painéis devem possuir seu posicionamento voltado para Norte. No caso de referenciar um local do Hemisfério Norte a posição dos painéis solares, como se pode observar na Figura 5, deve ser feita para Sul e a sua inclinação deve variar de acordo a estação de ano (PEREIRA, 2012).

Figura 5 - Posicionamento solar nas estações do ano



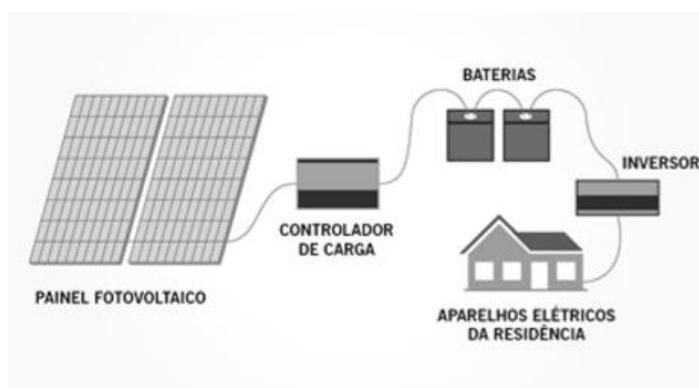
Fonte: Electronica (2014)

### 3.4 Tipos de sistemas fotovoltaicos

Um sistema fotovoltaico é aquele capaz de gerar energia elétrica a partir da radiação solar. Existem dois tipos de sistemas: os sistemas isolados (*off-grid*), como a Figura 6, ou seja, aqueles instalados em sua maioria em locais remotos ou isolados onde não é possível ou economicamente viável a conexão com a rede elétrica; e os sistemas conectados à rede (*on-grid*), onde o gerador completa a energia disponibilizada pela rede.

De acordo com Bluesol (2016, p.26), “O termo fotovoltaico significa a transformação da radiação solar diretamente em corrente elétrica, utilizando as células fotovoltaicas, também chamadas de células solares”.

Figura 6 - Sistema isolado (off-grid)



Fonte: Trevelin (2014)

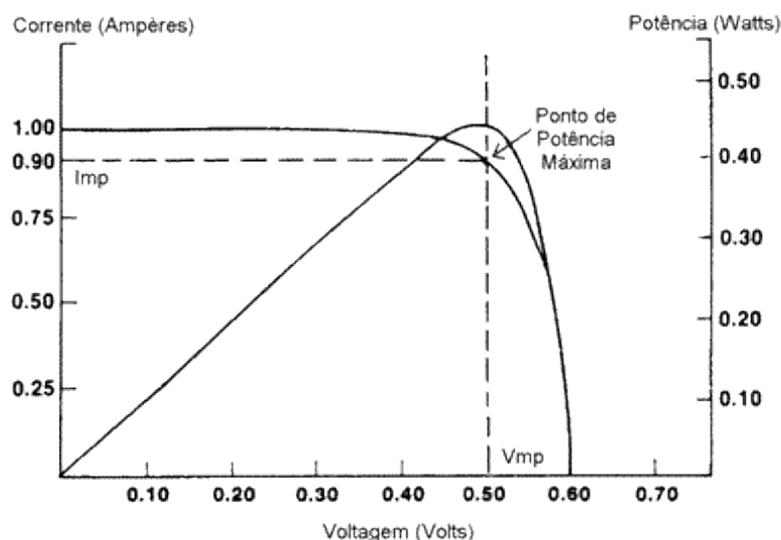
Um sistema fotovoltaico isolado da rede possui basicamente: painéis fotovoltaicos, controladores de carga, baterias e inversores.

Os painéis fotovoltaicos são arranjos de módulos solares, ou seja, um conjunto de células fotovoltaicas. Estas células ao recebem a radiação solar, surge uma diferença de potencial entre seus terminais, caracterizado pela movimentação de elétrons do material semicondutor, fazendo os atuarem como fontes de corrente contínua, a qual carregará as baterias do sistema. Por outro lado, os controladores de carga possuem a função de gerenciar o processo de carga e descarga das baterias, evitando que ocorra sobrecarga advinda dos painéis e descargas abruptas causadas pelos equipamentos ligados ao sistema. As baterias armazenam a energia excedente produzida pelos painéis para ser utilizada no período da noite ou em dias nublados. E por fim, para a conversão da corrente contínua advinda dos painéis e armazenada nas baterias, em corrente alternada para fornecimento de energia elétrica a eletrodomésticos ou equipamentos, utilizam-se os inversores. Os inversores, em sistemas do tipo *on-grid*, possuem o papel importante do sistema de manter a sincronia com a rede elétrica (TREVELIN, 2014).

De acordo com Acevedo (2006), existem diferentes tecnologias para fabricação das células fotovoltaicas comerciais. Destacam-se as células multicamadas e as orgânicas. Cada painel possui diversas células solares, cada uma produz relativamente pouca energia, normalmente, cada célula produz tensão em torno de 0,4 V e densidade de corrente por volta de 30 mA.cm<sup>-2</sup>. Essas células são arranjadas

de forma que maximizem e potencializem sua utilização. A curva de potência para cada célula específica pode ser observada na Figura 7.

Figura 7 - Curva característica de uma célula fotovoltaica



Fonte: Carvalho (2011)

De acordo com Carvalho (2011, p.25), existem cinco parâmetros ( $V_{OC}$ ,  $I_{CC}$ ,  $P_{máx}$ ,  $V_{mP}$  e  $I_{mP}$ ) que são especificados pelo fabricante, sendo:

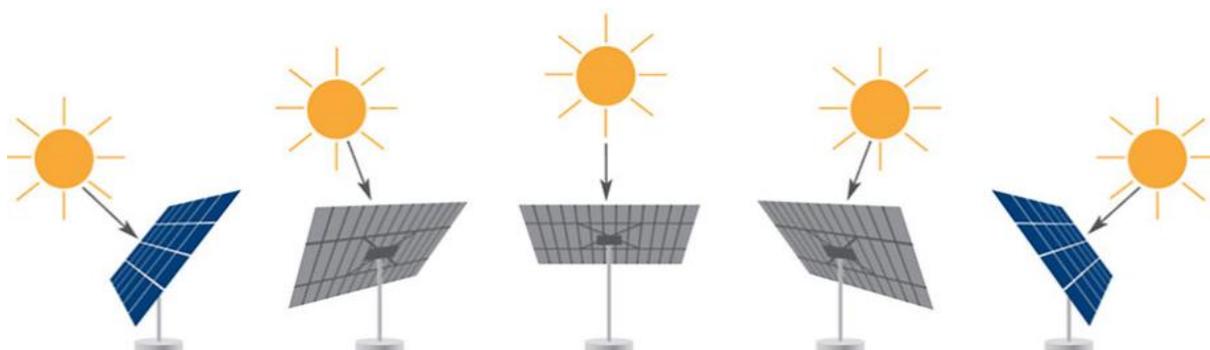
Tensão a vazio ( $V_{oc}$ ): tensão nos terminais quando a corrente de carga é nula;  
 Corrente de curto-circuito ( $I_{cc}$ ): corrente quando os dois terminais são curto-circuitados (tensão terminal nula); Para cada ponto da curva  $I \times V$ , o produto  $V$  representa a potência gerada que atinge um máximo ( $P_{máx}$ ) num dado valor de tensão ( $V_{mP}$ ) e de corrente ( $I_{mP}$ ).

### 3.5 Rastreamento Solar

A variação de incidência da radiação, causa perdas na conversão de energia de um painel fotovoltaico. Logo, surge a necessidade de se utilizar método de rastreamento do posicionamento solar, com intuito de fazer com que os painéis tomem uma posição mais perpendicular possível em relação ao sol. Esse reposicionamento contínuo faz com que os módulos fotovoltaicos captam uma maior quantidade de radiação disponibilizada pelo sol, conseqüentemente aumentando a produção de energia.

Esses seguidores solares, também conhecidos como trackers ou simplesmente rastreadores solares, reposicionam os módulos conforme demonstrado na Figura 8.

Figura 8 - Seguidor Solar

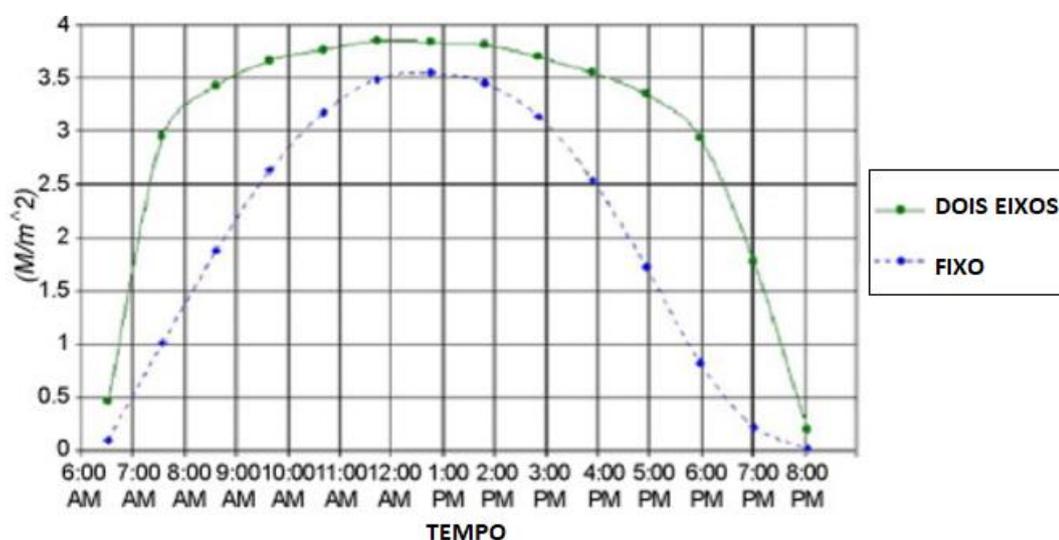


Fonte: Solar Motors (2018)

Conforme Jesús, (2009, p.14), o custo de um sistema de rastreamento, equivale aproximadamente 20% de um sistema fotovoltaico, mas é um investimento que aumenta as receitas em cerca de 40% e possui custo baixo de manutenção.

Na Figura 9, observa-se um gráfico com a comparação da energia produzida por um sistema fixo com um sistema de dois eixos.

Figura 9 - Gráfico da comparação da energia entre um sistema fixo e um sistema de dois eixos



Fonte: Cortez (2013)

Segundo Kvasznicza e Elmer (2006, p.27), os rastreadores devem possuir uma ou mais das características:

- Estrutura com uma ou duas colunas;
- Movimento de um ou dois eixos;
- Dispositivos de detecção de luz;

Alimentação de energia autônoma ou auxiliar;  
Seguidor de luz ou trajetória pré-programada;  
Movimento contínuo ou gradual;  
Rastreamento ao longo do ano, excetuando-se no inverno para algumas regiões geográficas.

Atualmente existem diversos tipos de seguidores solares, eles podem ter variações consideradas de custos, complexidade e funções.

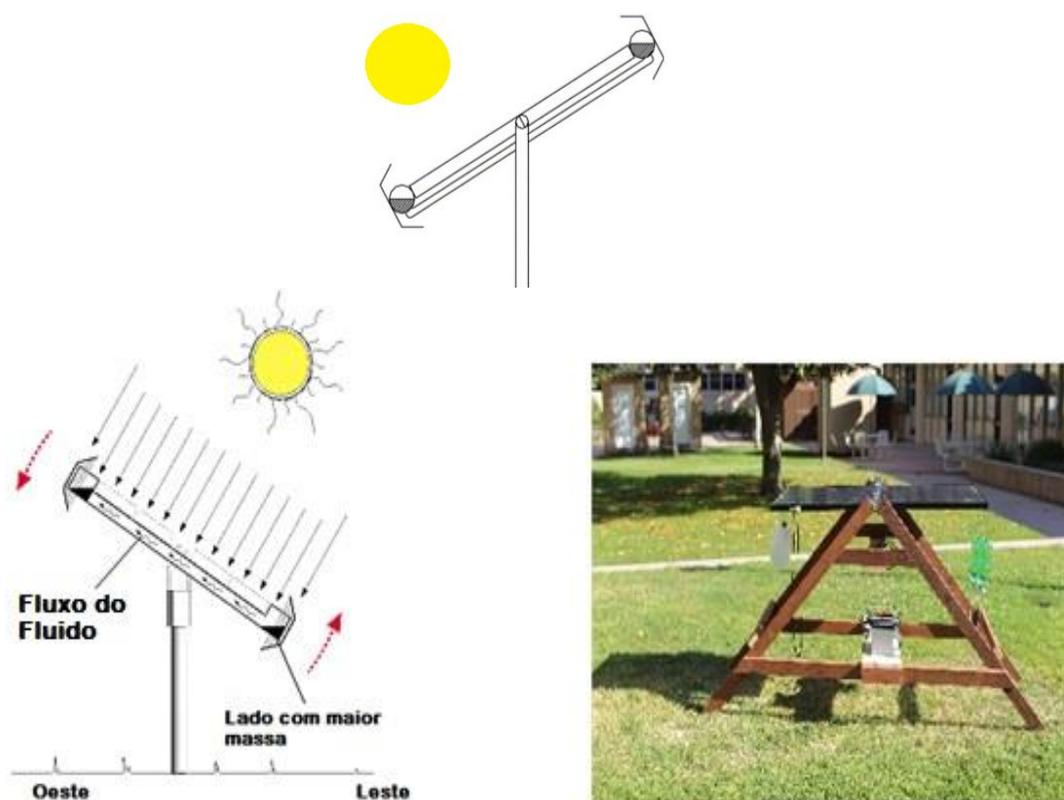
Os rastreadores são divididos basicamente em duas grandes categorias de rastreadores: passivos e ativos.

### *3.5.1 Rastreadores Passivos*

Rastreadores passivos são aqueles que não possuem um sistema de controle eletrônico. Esses dispositivos dispensam o uso de motores, e seu movimento ocorre devido à expansão/contração e eventualmente mudança de fase de um gás (normalmente, o freon) (PEREIRA, 2012).

Quando o gás passa por um aumento de temperatura ele aumenta seu volume, ao expandir ele vai provocando o movimento dos painéis solares de uma forma já definida no sentido de direcioná-los para o sol. Na Figura 10 é exibido um modelo dessa forma de seguidor, no qual o gás é colocado em tubos, um de cada lado do painel. Ao aquecer o gás ele passa para o estado gasoso e condensa no tubo do lado oposto provocando sua movimentação.

Figura 10 - Seguidor Passivo



Fonte: Cortez (2013)

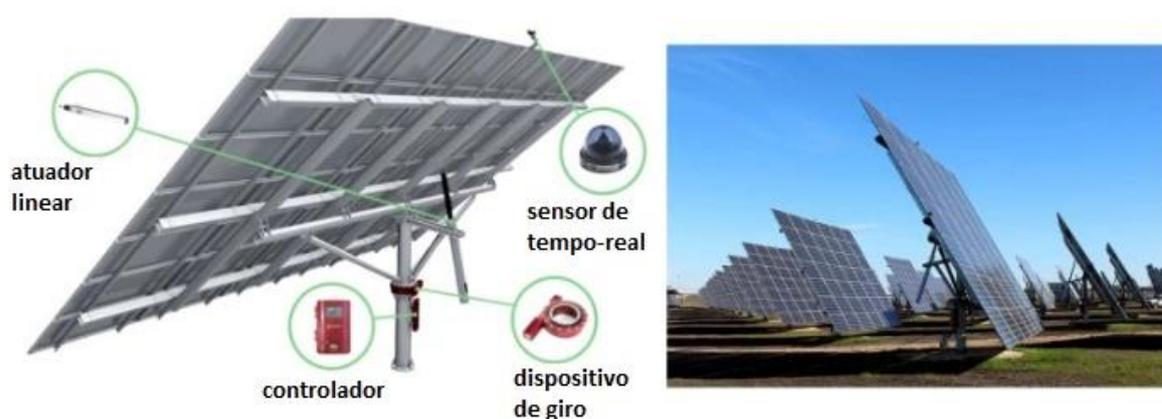
Os rastreadores passivos possuem fácil manutenção e baixo custo (são simples e não usam motores para movimento), mas, em contrapartida, possuem uma baixa precisão e só podem ser aplicados em locais que sofram uma variação térmica suficiente para provocar a expansão do gás. Além disso, sua construção exige eixos com baixo atrito e manutenção constante. Esse tipo de sistema é muito influenciado pela presença de ventos, radiação difusa e pouso de aves na parte móvel e não funciona em dias com pouca radiação. Movimentam-se apenas com um eixo (LIRA, 2014).

### 3.5.2 Rastreadores ativos

Os seguidores ativos são mais complexos, pois envolvem um sistema para processamento e controle, componentes eletrônicos, motores elétricos, atuadores, engrenagens e sensores. A Figura 11 mostra um exemplo de rastreador ativo e seus componentes que são:

- O atuador linear: responsável pela movimentação mecânica ascendente e descendente da estrutura onde são montados os painéis;
- Sensor de tempo real: responsável pela detecção do posicionamento do sol;
- Dispositivo de giro: permite rotacionar a estrutura onde são fixados os painéis;
- Controlador: é o dispositivo programável, responsável por processar as informações repassadas pelo sensor e tomar uma ação de posicionar a estrutura através do acionamento do atuador.

Figura 11 - Exemplo de um seguidor solar ativo e seus componentes



Fonte: Portal Solar (2018)

De acordo com Carvalho (2011), os rastreadores ativos baseiam-se em dois princípios fundamentais que regem sua movimentação: rastreamento microprocessado e por sensoriamento eletro-óptico.

O sistema puramente microprocessado consiste em uma execução de tarefas pré-determinada por um algoritmo de controle sem realimentação. Esta movimentação pode ocorrer em uma ou duas dimensões, não existindo limitações quanto ao passo de ajuste (CARVALHO, 2011).

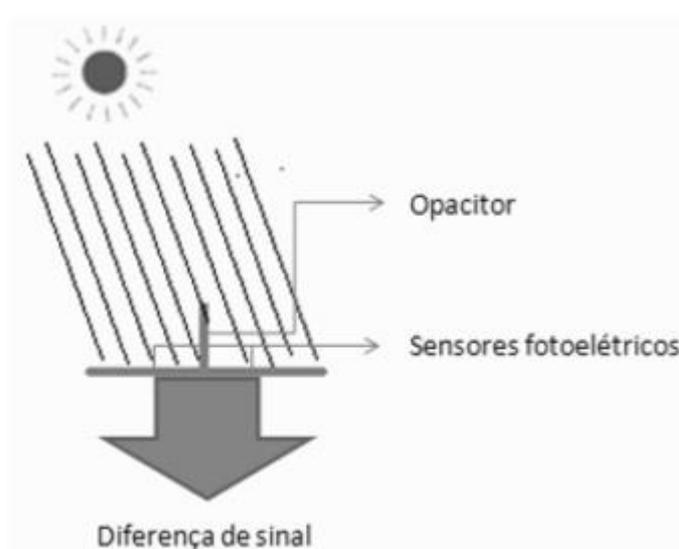
Por outro lado, os sistemas baseados no sensoriamento eletro-óptico, fundamentam-se em informações instantâneas de luminosidade. Assim, devem possuir ao menos um par de sensores fotossensíveis. No momento em que acontece uma diferença de sinal entre os sensores, o aparato aciona uma unidade motora sob

o comando de um microcontrolador, até que um completo ajuste aconteça, resultando na maximização da radiação captada (CARVALHO, 2011).

De acordo com Heredia *et al.* (2007, p.31) “existe, basicamente, três tipos de técnicas de detecção de sombreamento em módulos fotovoltaicos: detector por placa opaca, montagem inclinada de sensores fotoelétricos e detector por colimação”.

No método por detector por placa opaca, aplica-se dois fotosensores instalados paralelamente e entre eles uma placa opaca apresenta a atribuição de fazer sombra nos sensores de acordo com a posição do sol, o dispositivo mobilizará os motores que igualarão a radiação solar incidente, como observa-se na Figura 12 (HEREDIA *et al.*, 2007).

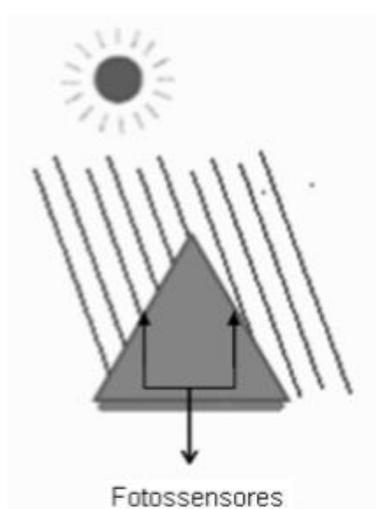
Figura 12 - Detector por placa opaca



Fonte: Carvalho (2011)

No método com montagem inclinada de sensores fotoelétricos, o aparato possui uma construção semelhante a uma pirâmide com detecção da intensidade da radiação em todas as faces. De acordo com Carvalho (2011, p.35), “esse formato possui a intenção de igualar a radiação incidente nas faces para que o sistema aponte sempre na posição exata da radiação máxima incidente”, como observa-se na Figura 13.

Figura 13 - Detector por montagem inclinada de sensores

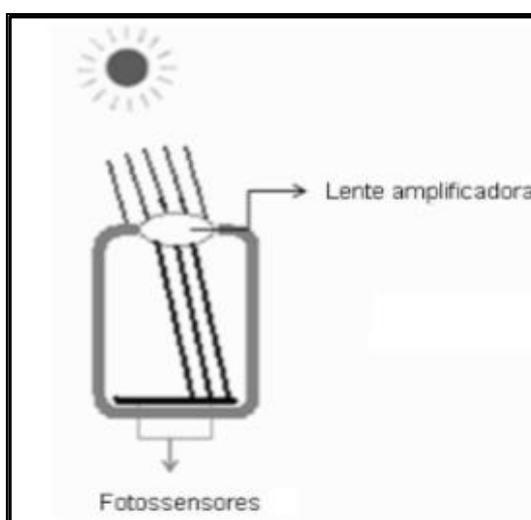


Fonte: Carvalho (2011)

O método por detector por colimação, geralmente, utiliza um cilindro como corpo opaco. De acordo com Heredia *et al.* (2007, p.33), “este é dividido em quadrantes onde são posicionados os sensores fotoelétricos que farão a medição da intensidade luminosa”.

Este método possui aplicação fácil, mesmo que utilizado em locais que recebam pouca luminosidade. Para se amplificar o sinal, utiliza-se no cilindro uma lente, como pode ser visto na Figura 14 (HEREDIA *et al.*, 2007).

Figura 14 - Detector por colimação com lente amplificadora



Fonte: Carvalho (2011)

### 3.6 Classificação dos Rastreadores Solares

De acordo com Lira (2014, p.32), “a utilização de rastreadores solares é uma das formas de aumentar a eficiência dos sistemas fotovoltaicos. O aumento de energia elétrica gerada nesses sistemas está associado às suas características construtivas”. Considerando essas características, Neto *et al.* (2010), classifica os rastreadores: Quando ao número de eixos rotativos e ao Tipo de estrutura.

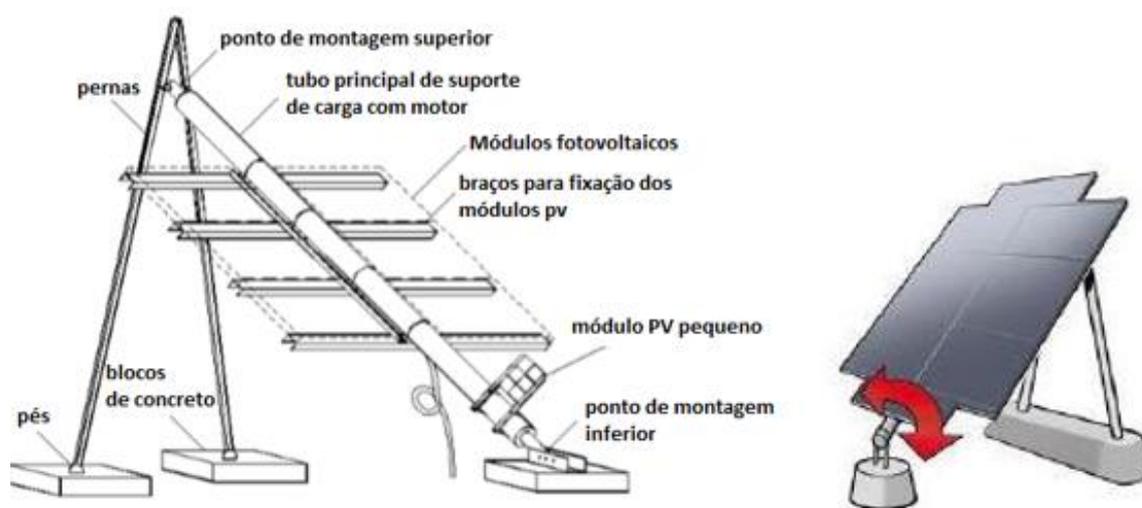
#### 3.6.1 Classificação dos rastreadores solares quanto ao número de eixos rotativos

Considerando a estrutura de movimento, os rastreadores são classificados de acordo com o número de eixos de sua estrutura, sendo de um ou dois eixos.

##### 3.6.1.1 Seguidor Polar de Eixo Único

Os rastreadores solares de eixo único, como ilustra a Figura 15, são do tipo que possuem um eixo Norte-Sul ou Leste-Oeste fixo em um ângulo, geralmente, fixos em uma posição angular correspondente a latitude do local. Possui apenas um motor, o que o torna um sistema simples e de menor consumo de energia. O tipo Leste-Oeste é o mais utilizado por ser este o movimento de maior variação do sol ao longo do dia, porém, nas regiões mais próximas aos polos essa variação de posicionamento do sol é menor, fazendo com que em alguns casos, a utilização do rastreamento solar norte-sul seja mais interessante (PEREIRA, 2012).

Figura 15 - Seguidor de Eixo Único



Fonte: Cortez (2013)

Esses sistemas podem ser posicionados horizontalmente, verticalmente ou inclinados, possuem menor custo, mas menor eficiência, devido o rastreamento ser em um único sentido (LIRA, 2014).

### 3.6.1.2 Seguidor Solar de dois Eixos

Este seguidor possui um poste vertical que permite o movimento segundo o eixo Leste-Oeste e um poste horizontal que permite em Norte-Sul. O eixo duplo, como visto na Figura 16, permite que os painéis acompanhem o movimento do sol nos dois eixos, por esse motivo possuem uma quantidade de atuadores maior para garantir que os painéis apontem sempre para o sol a qualquer hora e em qualquer lugar que esteja instalado, maximizando o percentual de energia convertida em relação ao sistema de eixo único (TREVELIN, 2014).

Figura 16 - Seguidor de dois eixos



Fonte: Trevelin (2014)

São comuns em parques solares e em instalações de grandes dimensões, podendo alguns deles suportarem uma área de colheita de até 300 m<sup>2</sup>. Mas a desvantagem desse tipo de seguidor é o esforço que estão sujeitos, como o seu peso e ao fato de terem que ser protegidos sempre que houver incidência de muito vento (TREVELIN, 2014).

### 3.6.2 Classificação dos rastreadores solares quanto ao tipo de Estrutura

Levando o tipo de estrutura em conta, os rastreadores solares são classificados em relação a suas bases de fixação, sendo: pedestal, *Roll-Tilt* ou plataforma giratória.

#### 3.6.2.1 Estrutura com Pedestal – Seguidor de Eixo Vertical ou de Azimute

De acordo com Lira (2014, p.33), “o pedestal consiste em um eixo posicionado na vertical empregado na estrutura de fixação dos módulos fotovoltaicos. Esse tipo de estrutura é empregado no ajuste da rotação em torno do eixo vertical (ângulo de azimute)”. Como pode-se observar na Figura 17.

Figura 17 - Rastreador solar com estrutura tipo pedestal (Seguidor vertical ou de Azimute)



Fonte: Lira (2014)

Segundo Lira (2014), este tipo de rastreador absorve menos de 7% da radiação que um seguidor de dois eixos e mais 4% do que um seguidor de eixo único. A vantagem desse seguidor é o fato dele ser mais robusto e de fácil implementação, compensando a menor radiação colhida. Na estrutura, a rotação acontece devido a engrenagens que são colocadas para movimentar a estrutura de fixação dos módulos, em torno do eixo vertical. Sendo considerada, uma estrutura de fácil instalação, o pedestal é fixado ao solo sobre uma base concretada.

### 3.6.2.2 Estrutura com Roll-Tilt – Seguidor de Eixo Horizontal

Os rastreadores solares com estrutura *roll-tilt* possui um eixo horizontal que serve como pivô para os painéis, permitindo um seguimento sazonal do sol. O ajuste da inclinação é feito pelos eixos posicionados perpendicularmente ao eixo de rotação (CORTEZ, 2013).

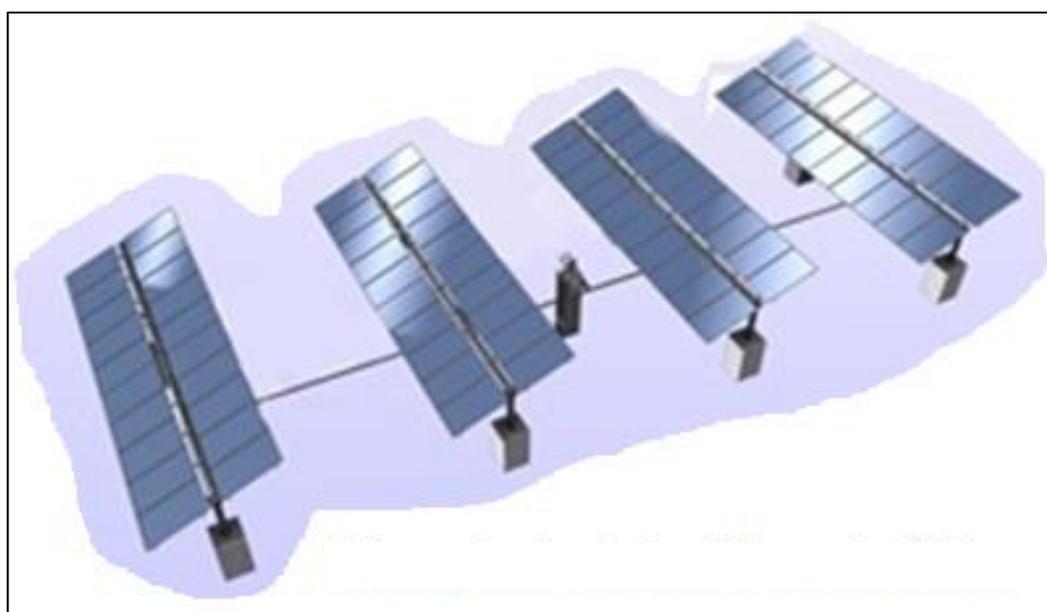
São muito simples e possuem baixo custo de instalação e manutenção por possuírem apenas um eixo, logo, possuem uma estrutura e sistema mais simples se comparado, por exemplo, com de dois eixos. A Figura 18 ilustra esse tipo de rastreador.

Figura 18 - Rastreador solar do tipo *roll-tilt*– Seguidor de Eixo Horizontal

Fonte: Pereira (2012)

Essa estrutura não garante uma alta eficiência, mas se considerar um conjunto de rastreadores, tem-se um aumento considerável da eficiência total do sistema se comparado a um modelo convencional com módulos fixos. Esse modelo de estrutura possui a desvantagem de dificultar a instalação de um seguidor solar de dois eixos, mas pode funcionar perfeitamente com um eixo fixo. A Figura 19 traz um exemplo com 4 módulos rastreadores.

Figura 19 - Sistema de eixo horizontal com 4 módulos



Fonte: Pereira (2012)

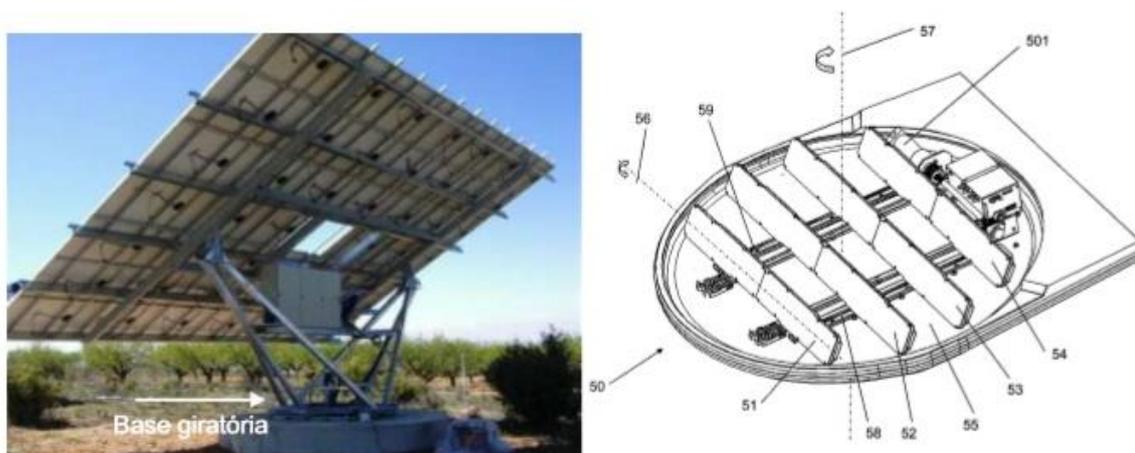
Esse modelo de estrutura é utilizado em sistema com um grande número de módulos, conforme demonstrado na Figura 19, mas possuem uma grande

complexidade de implementação em relação à parte mecânica, uma vez que existem acoplamentos mecânicos nas partes giratórias.

### 3.6.2.3 Estrutura com Plataforma Giratória – Seguidor de plataforma rotativa de dois eixos

Este rastreador consiste em uma plataforma que roda sobre uma base fixa que faz o seguimento no sentido Leste-Oeste. Sobre essa plataforma estão os painéis em fileiras sobre um eixo horizontal que faz o seguimento Norte-Sul. São utilizados em sistemas de grande porte, compostos por muitos módulos solares ou concentradores parabólicos. Possuem esse nome devido ao formato da sua base, que é circular, como se pode observar na Figura 20 (LIRA, 2014).

Figura 20 - Rastreador solar com plataforma giratória (Rotativa de dois eixos)



Fonte: Lira (2014)

Apesar de coordenarem um grande número de painéis, esses rastreadores necessitam de manutenção constante nas partes móveis, remoção de obstáculos que possam surgir na área do seguidor e precisam de uma grande área para esta configuração (CORTEZ, 2013).

### **3.7 Rastreamento de máxima potência para sistemas fotovoltaicos**

Em busca de meios que garantam uma maior conversão de energia, o método de rastreamento pelo máximo ponto de potência, é hoje um modelo de rastreamento solar muito promissor.

O objetivo principal do rastreamento pelo máximo ponto de potência é movimentar os painéis solares para o local onde o produto da corrente e tensão é máxima, conseqüentemente esse é o melhor posicionamento dos módulos para garantir uma otimização na produção de energia elétrica em uma unidade geradora fotovoltaica.

Ao contrário da incidência solar que é proporcional a produção de eletricidade, a alta temperatura nos módulos é um fator complicador, ela é responsável por uma queda importante do valor de tensão, e uma elevação pequena na intensidade de corrente elétrica que não chega a compensar o abaixamento da tensão, mas causa perdas consideráveis da geração elétrica (PINHO, 2014).

A forma de rastreamento PMP (Máximo Ponto de Potência) é complexa, pois as constantes mudanças das condições naturais do ambiente e os sombreamentos causados por nebulosidades são fatores complicadores que exigem que o sistema tenha uma programação altamente difícil.

Apesar de possuir a grande vantagem de encontrar o ponto ideal de posicionamento dos painéis levando em consideração os parâmetros elétricos, esse modelo de rastreamento exige um constante reposicionamento que para sistemas reais, podem acarretar em inviabilidade do projeto pelo fato do grande consumo de energia e o alto investimento inicial.

### **3.8 Comparação entre sistemas rastreadores**

Conforme demonstrado nos itens anteriores, cada modelo de rastreador possui suas particularidades. O trabalho de Huang (2011), retratado no gráfico da Figura 21, compara os rendimentos na geração de energia dos vários tipos de rastreadores solares citados nas seções anteriores, em quatro cidades da Europa diferentes, Siracura na Itália, Praga na República Checa, Manchester na Inglaterra e Tronsoe na Noruega.

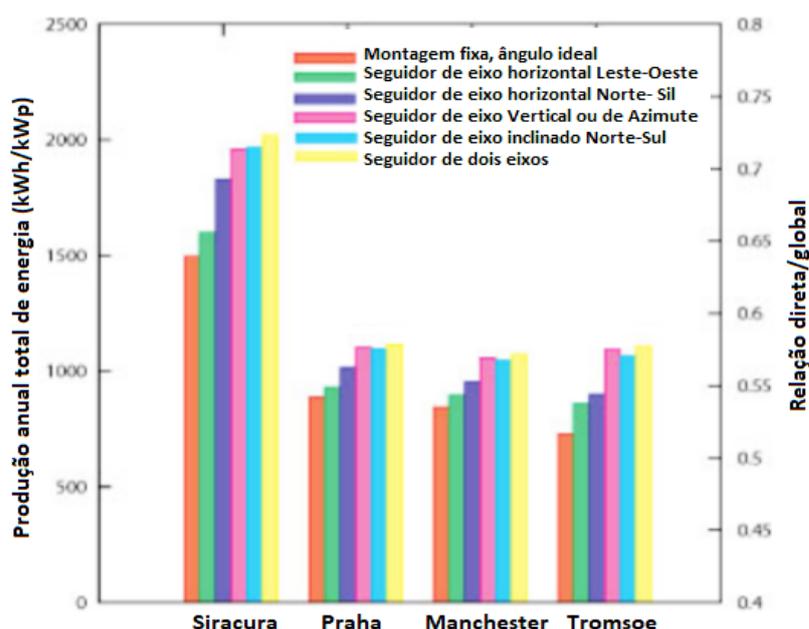
Usando um sistema fotovoltaico de 1KWp conectado a rastreadores solares, projetados para posicionar os módulos fotovoltaicos apenas na posição perpendicular ao sol, Huang (2011) certificou que sistemas rastreadores de um eixo inclinado na posição Norte-Sul funcionam tão bem quanto um sistema de dois eixos na produção de energia elétrica. Seus estudos apontam uma variação média inferior de 2% da quantidade de energia gerada de um rastreador de um eixo com inclinação, em relação a um sistema rastreador de dois eixos, modelo que apresenta maior eficiência na geração.

Em comparação a um sistema com montagem fixa no melhor posicionamento para absorção da radiação, a variação da quantidade de energia elétrica produzida com a utilização de sistema rastreador de dois eixos na Europa foi de aproximadamente:

- 30% maior no Sul da Europa;
- 25% maior na Europa Central;
- 50% maior no Norte da Escandinávia.

Conforme demonstrado nos estudos o modelo de rastreamento em dois eixos, torna-se uma alternativa de otimização muito positiva principalmente se comparada ao modelo de montagem fixa convencional.

Figura 21 - Comparação da estimativa da energia produzida de um sistema de 1 kWp usando vários modelos de seguidores



Fonte: Huang *et al.* (2011)

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Abordagem de Pesquisa

A pesquisa realizada para o presente projeto é de caráter quantitativo e qualitativo, uma vez que o objetivo principal é avaliar o provável ganho de geração de energia elétrica utilizando um sistema automatizado de posicionamento de módulos fotovoltaicos, com propósito de elevar o desempenho do sistema e melhorar sua eficiência.

### 4.1 Método da Pesquisa

- Realizar estudo bibliográfico sobre as características funcionais de um sistema de geração de energia fotovoltaico.
- Desenvolver uma nova modelagem na configuração elétrica do conjunto dos módulos fotovoltaicos da usina proposta para esse trabalho, de forma a se obter dois conjuntos de placas independentes e de potências iguais.
- Avaliar através de índices solarimétricos extraídos de bancos de dados existentes, o ângulo de inclinação dos painéis fotovoltaicos de melhor incidência de radiação solar definido pela localização geográfica.
- Alterar o sistema automatizado de movimentação dos módulos fotovoltaicos de forma a permitir que um conjunto de placas seja posicionado fixo em um ângulo pré-determinado de acordo com a incidência de radiação.
- Conectar os inversores em rede para possibilitar o monitoramento dos parâmetros elétricos de geração através do software computacional de gerenciamento de energia.
- Fazer o levantamento do custo da implantação do sistema de movimentação dos módulos fotovoltaicos.
- Mensurar o consumo de energia do sistema de posicionamento dos painéis solares.
- Coletar os dados de geração durante um mês e avaliar o desempenho dos dois sistemas separadamente através de métodos comparativos e de retorno do investimento.

## **5 ESTUDO DE CASO**

O desenvolvimento do presente trabalho foi realizado nas dependências de uma empresa de cosméticos localizada na cidade de Alvinópolis Minas Gerais.

Esse estudo de caso tem como objetivo principal, avaliar a viabilidade econômica e a produção de geração de um sistema fotovoltaico real que utiliza um rastreador solar com propósito de maximizar a produção de geração de energia.

Para análise dos cálculos foram levados em consideração: aumento tarifário anual, depreciação, taxa mínima de atratividade, custos de operação e inflação.

A motivação da realização desse estudo se deu devido a oportunidade dada pelo proprietário do empreendimento aos autores desse trabalho de acessar, modificar e levantar dados da planta real de seu sistema fotovoltaico, garantindo um estudo mais aprofundado e realista.

Outro ponto a se destacar é que na realização dos cálculos de viabilidade, foram utilizados valores reais da planta, incluindo o consumo de energia elétrica do sistema de rastreamento solar, os valores faturados pela distribuidora de energia e o capital investido para implantação da unidade geradora.

Esses dados garantem um estudo diferenciado da grande maioria dos trabalhos acadêmicos que são realizados com base de dados obtidos com a utilização de protótipos de dimensões reduzidas, focados apenas na avaliação de ganho de eficiência da produção de energia elétrica.

### **5.1 Característica do empreendimento em estudo**

A UFV em estudo trata-se de um sistema de geração de energia fotovoltaica caracterizada por microgeração pelos moldes da Resolução 482, que é a geração de energia com potência até 100KW de capacidade instalada, gerada por meio de fontes renováveis (ANEEL, 2010).

O empreendimento foi construído sobre o solo e é composto por 40 módulos fotovoltaicos policristalinos de 265Wp e 2 inversores fotovoltaicos monofásicos da marca Fronius, possuem ainda suportes para fixação dos painéis e dispositivos auxiliares de proteção.

O sistema adotado do gerador fotovoltaico foi tipo On-grid, conectada através da rede da concessionária CEMIG na tensão bifásico de 220V. A unidade geradora

possui uma potência nominal em corrente contínua de 10,6KWp e uma potência nominal em corrente alternada de 10KVA limitada por dos dois inversores de 5KW.

## 5.2 Características dos equipamentos principais empregados no Gerador

Os dois principais equipamentos que compreendem um sistema fotovoltaico são os módulos e o inversor fotovoltaico. O módulo fotovoltaico é a fonte primária de geração, responsável por converter a radiação solar em eletricidade através do efeito fotovoltaico. Os módulos comerciais presentes no mercado variam em formas, tipo de células, quantidade de células, eficiência e potência final.

O módulo utilizado na usina estudada é o modelo SE-P265NPB-A4 do fabricante Sunedison e possui as características apresentadas na Figura 22:

Figura 22 - Características do módulo fotovoltaico empregado na planta de geração fotovoltaica em análise

<b>SE-P265NPB-A4 (Fabricante: Sun Edison)</b>		
<b>Descrição</b>	<b>Unidade</b>	<b>Característica</b>
Tipo da Célula		Policristalino
Potência	Wp	265
Tensão de Circuito Aberto	V	37,81
Corrente de Curto Circuito	A	9,24
Tensão de máxima potência	V	30,71
Corrente de máxima potência	A	8,63
Quantidade de Células		60
Eficiência do Módulo	%	16,2%
Conector		Compatível MC4
Peso	kg	18,6
Dimensões (CxLxA)	mm	1650x992x35
Diodos de <i>By-pass</i>		3
Coefficiente de Temperatura na Potência	%/°C	-0,42%
NOCT	°C	45 ± 2

Fonte: Sunedison (2015)

Outro equipamento utilizado no sistema primordial para o seu funcionamento é o inversor fotovoltaico, o inversor é um equipamento eletrônico que tem a função de converter tensão e corrente contínua (CC) em tensão e corrente alternada (CA).

A necessidade do uso do inversor se dá pelo fato da corrente elétrica produzida pelos módulos solares ser CC, e a rede elétrica utilizada na unidade consumidora ser alimentada e composta por cargas CA.

O modelo do inversor fotovoltaico utilizado na instalação em estudo é o PRIMO 5.0-1 do fabricante internacional Fronius.

O inversor Fronius foi configurado para atender ao código de rede brasileiro e seguir os valores determinados de compatibilidade eletromagnética pelos procedimentos de rede e normas da concessionária para paralelismo constante com a rede de distribuição. Como referência para parametrização foi utilizado valores de ajuste contidos na norma ND. 5.30- Requisitos para a conexão de Acessantes ao Sistema de Distribuição Cemig – conexão em baixa tensão.

As principais características do inversor Fronius PRIMO 5.0-1 estão apresentadas na Figura 23.

Figura 23 - Dados das características do inversor Fronius PRIMO 5.0-1

	Inversor (Fabricante: Fronius)		
	Descrição	Unidade	Requisito
	Topologia		<i>transformerless</i>
	Modelo		PRIMO 5.0-1
	Potência	kVA	5
	Tensão de Entrada (MPPT)	V	240-800
	Tensão de Entrada Máxima	V	1000
	Tensão de Saída Nominal	V	220
	Distorção harmônica total (THDi)	%	< 5%
	Fator de Potência ajustável		0,85 - 1 ind/cap
	Máxima Corrente de Saída	A	21,7
	Eficiência Máxima	%	98,0
	Peso	kg	21,5
	Dimensões	mm	645 x 431 x 204
	Grau de Proteção (IP)		65

Fonte: Fronius (2019)

### 5.2.1 Características dos dispositivos de proteção

A proteção contra sobrecargas e curtos circuitos do sistema fotovoltaico foi feito utilizando componentes de proteção diferenciados para o circuito de corrente contínua e o circuito de corrente alternada.

Para o circuito de corrente contínua, obtida da geração na saída dos painéis solares foram utilizados para proteção fusíveis modelo SRD-30 gPV do fabricante Suntime, produzidos exclusivamente para aplicações em sistemas fotovoltaicos.

Os fusíveis Suntime foram instalados na entrada do inversor, eles têm o trabalho de atuar no momento em que houver uma sobrecorrente, evitando com que os cabos sobreaqueçam e danifiquem algum equipamento pela ação da elevação do valor de corrente.

Os fusíveis Suntime possuem tensão nominal de 1000VDC e corrente nominal de 10A. O valor de 1000VDC especificado, foi dimensionado devido esse ser o maior valor de tensão que é possível obter na entrada do inversor fotovoltaico utilizado sem danificá-lo, já a corrente de 10A foi estabelecida devido a máxima corrente que o painel utilizado pode atingir, que é a corrente de curto circuito com valor de 9,24A.

Para o circuito de corrente alternada proveniente na saída dos inversores fotovoltaicos, foram utilizados disjuntores com capacidade máxima suficiente para a proteção do condutor entre o Inversor e o quadro de distribuição.

Devido a corrente de saída máxima do inversor ser 21,7A, o disjuntor bipolar dimensionado para proteção do circuito, possui uma corrente nominal de 25A, ele é incumbido de proteger o condutor utilizado de alimentação que possui seção transversal de 6mm<sup>2</sup>.

No caso de uma possível manutenção, o inversor ainda possui uma chave seccionadora como opção podendo ser acionada sob carga, permitindo o desligamento do equipamento.

### **5.3 Infraestrutura do sistema elétrico de abastecimento de energia**

O fornecimento de energia na unidade geradora é feito através da rede de baixa tensão da concessionária CEMIG em tensão nominal de 220V. A unidade consumidora é tarifada no grupo B, subgrupo B2, que é a instalação rural atendida em tensão abaixo de 2300V.

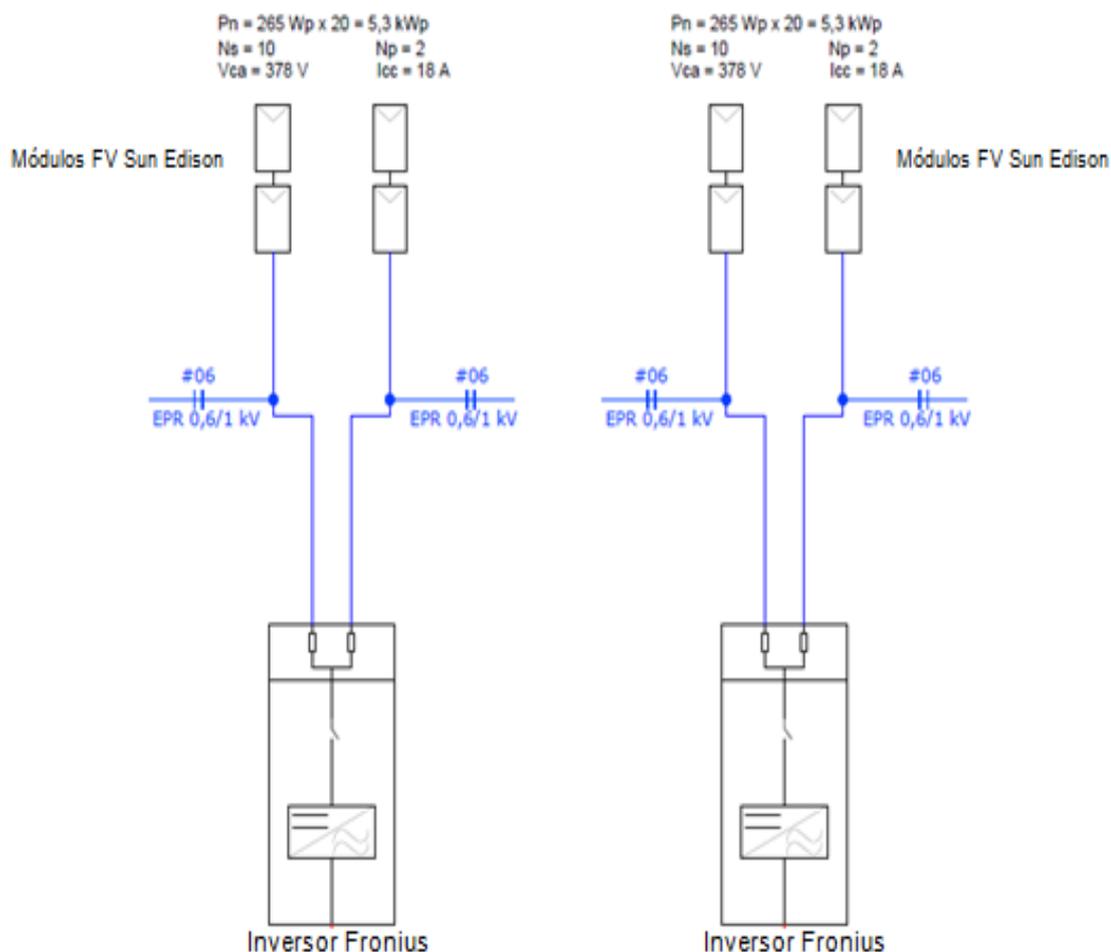
A potência máxima disponibilizada pela rede de alimentação da concessionária CEMIG é de 15KVA para o empreendimento, potência do transformador de uso exclusivo da fonte consumidora, porém o sistema fotovoltaico se limita a potência máxima de 10 KVA devido a corrente nominal do disjuntor de entrada ser de 60A.

#### 5.4 Configuração de ligação da Usina Fotovoltaica.

A usina fotovoltaica conforme relatado no item 4.1, possui 40 módulos fotovoltaicos, esses módulos inicialmente tiveram sua ligação projetada em dois arranjos com 20 módulos ligados em série em cada inversor.

De forma a facilitar a utilização do rastreador solar e disponibilizar os módulos em quatro suportes independentes houve a necessidade que essa configuração fosse alterada, atualmente cada inversor fotovoltaico possui 20 módulos ligados aos seus terminais de entrada, sendo dois conjuntos de 10 placas interligadas em série, conforme exemplificado na Figura 24:

Figura 24 - Ligação dos módulos fotovoltaicos do sistema



Fonte: Autores (2019)

A configuração de dois conjuntos semelhantes foi muito importante para esse estudo, pois, possibilitou um trabalho individualizado de coleta de dados entre

sistemas com mesmos parâmetros elétricos, mesmos modelos de equipamentos, submetidos na mesma condição ambiental.

Importante ressaltar que apesar dos dois conjuntos possuírem características parecidas, não podem ser considerados idênticos, pois o rendimento global, que é o rendimento do sistema considerando fatores de perdas são diferenciados devido diversos fatores como:

- Perdas por temperatura – ocorrem devido a diferença de troca térmica entre os grupos de painéis, provocado principalmente pela localização e pelo sentido da ventilação ambiente que não é uniforme.
- Incompatibilidade elétrica – mesmo possuindo mesmos equipamentos, de mesmos fornecedores, ainda existe uma diferença das características físicas dos materiais utilizados que resultam em perdas diferentes.
- Acúmulo de sujeira – a sujeira alojada pela exposição dos painéis torna se um fator de perda considerável, e mesmo que os conjuntos de módulos fotovoltaicos estejam próximos, ainda há uma diferença de sujeira acumulada significativa entre eles.
- Perdas no cabeamento – Mesmo estando próximos, há uma diferença no comprimento do cabeamento, essa diferença resulta em perdas elétricas diferentes para os dois grupos de módulos utilizados.

### **5.5 Recursos solar e condições climáticas da região**

Um fator determinante para produção de energia elétrica de um sistema fotovoltaico é a radiação solar e as condições climáticas da região onde serão instalados os painéis fotovoltaicos.

De acordo com o CRESESB (2019), a média mensal de irradiação solar na cidade de Alvinópolis é de 4,87KWh/m<sup>2</sup>dia, para um ângulo de inclinação igual a latitude que é 20° voltada para o Norte, estratificado na Figura 25.

Figura 25 - Média de Radiação na cidade de Alvinópolis-MG

Estação: Alvinópolis																
Município: Alvinópolis, MG - BRASIL																
Latitude: 20,101° S																
Longitude: 43,049° O																
Distância do ponto de ref. ( 20,0955° S; 43,0443° O); 8 km																
#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m <sup>2</sup> .dia]													
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta
✓	Plano Horizontal	0° N	5,50	5,78	4,81	4,41	3,77	3,63	3,83	4,60	4,89	4,93	4,67	5,34	4,68	2,15
✓	Ângulo igual a latitude	20° N	5,02	5,53	4,90	4,87	4,48	4,50	4,68	5,29	5,15	4,81	4,34	4,83	4,87	1,19
✓	Maior média anual	19° N	5,06	5,55	4,90	4,85	4,45	4,47	4,65	5,26	5,15	4,83	4,36	4,86	4,87	1,19
✓	Maior mínimo mensal	17° N	5,12	5,59	4,91	4,83	4,40	4,39	4,58	5,21	5,14	4,85	4,41	4,93	4,86	1,20

Fonte: CRESSES, (2018)

## 5.6 Modelo do rastreador solar estudado

Conforme descrito na seção 4.3.1, o reposicionamento dos painéis solares ao longo do dia, é de primordial importância para um melhor desempenho na geração de uma unidade geradora fotovoltaica, pois a otimização da captação da radiação solar é proporcional a produção de energia elétrica. Fundamentado nessa informação o proprietário do empreendimento onde foi realizado esse estudo, solicitou o desenvolvimento de um modelo de rastreador solar, com propósito de aumentar sua produção de energia elétrica.

O rastreador desenvolvido possui quatro plataformas giratórias do tipo roll-tilt, e permite um rastreamento solar em um único eixo, orientação Leste a Oeste, percorrendo o caminho conforme demonstrado no Anexo A, B e C.

O eixo de cada estrutura do rastreador possui nas suas extremidades rolamentos, com propósito de minimizar a fricção entre as partes móveis.

A movimentação do eixo da estrutura é feita por um pistão hidráulico montado com articulação rotulada da haste, ele realiza movimentos ascendente e descendente através da inserção de óleo injetada por uma bomba no interior do cilindro, o fluido é pressionado e transforma a energia recebida em energia mecânica, proporcionando a elevação da estrutura. A haste articulada é responsável pelo posicionamento angular da estrutura onde são alojados os módulos fotovoltaicos.

A estrutura do rastreador possui um ângulo de inclinação de 20° na direção Norte, esse ângulo foi definido pela empresa que instalou o sistema, e foi escolhido levando em consideração o ângulo da latitude da localização em que o sistema fotovoltaico foi instalado, considerado o ângulo de maior incidência de radiação.

Figura 26 - Conjunto de módulos da usina



Fonte: Autores (2019)

O rastreamento do sol é realizado de forma cronológica, através da utilização de um controlador lógico programável, que é um equipamento computadorizado, onde é possível inserir uma programação para supervisionar as atuações das cargas.

Os tempos foram inseridos no programa de maneira empírica, não houve um estudo específico para programação, toda regulagem se deu através de observações diárias.

A utilização de um rastreador cronológico em estudo, não é uma excelência quando o assunto é eficiência, atualmente possuem modelos de rastreadores solares que realiza o rastreamento com utilização de sensores, onde é possível encontrar o máximo ponto de potência, que é o melhor ponto de geração, levando em consideração tanto o posicionamento, quanto nebulosidade e temperatura.

Porém esse modelo em estudo é de construção mais simples, demanda um consumo de energia e investimento inicial menor se comparado aos rastreadores mais eficientes.

Os rastreadores que utilizam o rastreamento pelo máximo ponto de potência necessitam a cada alteração de posicionamento, comparação dos parâmetros de leitura com o último ponto estabelecido, ocasionando o acionamento do sistema de rotação um número maior de vezes, resultando em maiores consumos de energia e maior desgaste dos equipamentos.

O rastreador estudado foi desenvolvido e projetado por profissionais da área da elétrica industrial da própria empresa proprietária da usina, utilizando um comando

que possui como parte central de processamento o micro controlador lógico programável Click Weg modelo CLW-02 / 10HR-A, ele permite a inserção de blocos com temporizadores que acionam o sistema hidráulico de forma a processar o movimento de rotação dos painéis. No anexo D e E está a lógica de programação utilizada e o esquema elétrico desenvolvido.

No comando elétrico também foi inserido um inversor de frequência Toshiba modelo VFNC3 para controle de velocidade e acionamento do motor trifásico da bomba hidráulica de 1CV de potência. A imagem do quadro de comando onde foi montado os equipamentos de controle pode ser visualizado na Figura 27.

Figura 27 - Quadro de Carga e Comando do Rastreador



Fonte: Autores (2019)

Os módulos fotovoltaicos foram fixados em quatro estruturas roll-tilt em grupos de 10 unidades. O suporte de fixação foi feito todo em perfil de aço, ele tem a vantagem de possuir alta resistência de tração, compressão e flexão, permitindo aos elementos estruturais suportarem grandes esforços exigidos pelas ações dos ventos.

Figura 28 - Estrutura do Rastreador Solar



Fonte: Autores (2019)

A movimentação do conjunto de placas do rastreador é feita pelo sistema hidráulico demonstrado na Figura 29, composta por uma Central que possui: 1 motor elétrico trifásico 220V de 1CV de potência, uma bomba hidráulica modelo FDR-002N, uma válvula de alívio responsável por impedir um excesso de pressão que pode causar danificação em algum equipamento e uma válvula direcional elétrica TN6 220V, responsável por direcionar o fluido para os cilindros.

Figura 29 - Unidade Hidráulica



Fonte: Autores (2019)

O atuador utilizado na estrutura do rastreador demonstrado na Figura 30, responsável pelo movimento mecânico de rotação é um cilindro de 2" de diâmetro e um curso de 600mm.

Figura 30 - Cilindro hidráulico montado com articulação rotulada da haste



Fonte: Autores (2019)

Para limitar o curso de movimentação do rastreador fazendo com que em uma eventual falha elétrica o sistema se desenergize, foi montada na estrutura duas chaves da fabricante Schmersal modelo MK015-11Y-M20, essa chave limita a movimentação da estrutura, fazendo com que o motor da bomba permaneça desenergizada no momento em que a chave for atuada.

### **5.7 Programação dos tempos**

As programações dos tempos foram realizadas através de observações diárias do posicionamento solar, em média o sistema é atuado 18 vezes durante o dia para rastreamento do sol.

O número de acionamentos do rastreador ao longo do ano é variável devido movimento de translação da terra, o que origina dias de sol mais extensos dependendo das estações. Essa situação demandou a inclusão de um número grande de módulos temporizadores na programação.

Em média cada atuação do sistema tem duração de 5 segundos no intervalo de 20 minutos, com a bomba alimentada pelo inversor de frequência em 50Hz.

Nesse tempo de atuação o sistema rastreador proporciona uma movimentação angular de aproximadamente 5° a cada 20 minutos, suficiente para reposicionar os painéis perpendiculares ao novo posicionamento solar.

O rastreador entra em operação de maneira automática no período de 10 às 17 horas. Quando o sistema fotovoltaico está inoperante devido à falta de luminosidade solar no período noturno, é feito o reposicionamento de todos os módulos na posição inicial, para que no próximo dia um novo ciclo recomece.

### **5.8 Alteração do sistema rastreador para realização da coleta dos dados**

O seguidor solar foi instalado na unidade geradora fotovoltaica na intenção de aumentar a produção de energia elétrica em 30%, esse valor foi estimado pela empresa que instalou a fonte geradora, porém, não foi realizado nenhum estudo mais detalhado para verificação da viabilidade do projeto ou do ganho de produtividade real após sua implantação.

Na intenção de mensurar esses valores, os autores desse trabalho, efetuaram modificações no sistema de rastreamento. Conforme demonstrado na Figura 26, o sistema é composto por quatro estruturas com 10 módulos cada, os 4 conjuntos estão conectados em uma unidade hidráulica principal comandadas pelo controlador lógico programável.

Para realização da coleta de dados comparando um sistema fixo e outro com seguidor solar real nas mesmas condições ambientais, houve a necessidade de individualizar cada arranjo em válvulas direcionais exclusivas, acarretando em modificações expressivas na unidade geradora.

Inicialmente o sistema era composto por duas válvulas direcionais conectadas a unidade hidráulica: uma responsável por fazer o movimento do sentido horário das quatro estruturas (sentido Leste-Oeste), já a outra válvula é responsável por realizar o movimento contrário, ou seja, em um momento a válvula direciona o fluido através da pressurização da bomba em um lado do pistão, outra hora o óleo é direcionado a retornar ao reservatório.

Com objetivo de tornar cada conjunto de placas independente, foi inserido ao sistema hidráulico um bloco com oito válvulas direcionais demonstradas na Figura 31,

duas para cada uma das quatro estruturas que suportam os módulos fotovoltaicos, e oito válvulas reguladoras de fluxo apresentadas na Figura 32, responsável por estrangular a passagem de óleo enviado ao pistão.

Figura 31 - Válvulas Direcionais



Fonte: Autores (2019)

Figura 32 - Válvulas reguladoras de fluxo



Fonte: Autores (2019).

Ao tornar duas estruturas independentes, foi deparada uma situação de erro que demandou a instalação das válvulas reguladoras de fluxo. Ao colocar dois conjuntos de módulos fixos, o volume de óleo enviado as outras duas estruturas conectada ao rastreador, teve a vazão de óleo duplicada.

Para fazer a correção do posicionamento dos módulos em relação ao sol com a nova configuração, houve a necessidade de diminuir a velocidade do motor da bomba, feita através da redução do parâmetro de frequência do inversor da bomba.

A diminuição da frequência resultou em uma perda de torque significativa no motor, fazendo com que o inversor detectasse como uma situação anormal de sobrecarga, acionando a proteção e interrompendo o funcionamento da bomba.

Ao instalar as válvulas reguladoras de fluxo de óleo, foi feita uma compensação no circuito hidráulico diminuído o fluxo de óleo, e posteriormente refeita a programação do parâmetro da frequência do inversor de acionamento da bomba, aumentando gradativamente até que a detecção de falha não fosse mais ativada pela proteção do inversor de frequência.

Posteriormente foi feita nova regulagem de posicionamento do rastreador, alterando os tempos de atuação na programação do controlador lógico programável e a regulagem do fluxo de óleo através da válvula reguladora, até que o sincronismo do rastreador fosse refeita na nova configuração.

## **5.9 Coleta dos dados**

A coleta dos dados foi feita no período de 12/04/2019 à 28/04/2019, as informações foram obtidas através do software da Fronius instalado no inversor fotovoltaico que monitora o sistema, possibilitando a retirada dos dados via pendrive.

No período de medição, as condições climáticas não foram muito favoráveis para o sistema fotovoltaico. Alguns dias foram marcados por muita nebulosidade, acarretando perdas na eficiência de geração.

Os valores de radiações globais não foram mensurados no trabalho, devido falta de instrumentos para essa aferição. O monitoramento das condições ambientais no momento de cada coleta de dados também ficou fora do escopo desse projeto.

Para coleta dos dados foi feita uma reconfiguração na placa do inversor demonstrada na Figura 33, através de inserção de jump's, alterando a coleta de dados via rede ethernet para coleta local através da utilização de um pendrive, toda alteração realizada foi feita com o auxílio da assistência técnica do fabricante Fronius.

Figura 33 - Imagem interna do Inversor fotovoltaico no momento da reconfiguração



Fonte: Autores (2019)

Finalizada a reprogramação do inversor Fronius para coleta das informações dos parâmetros elétricos de geração no pendrive, foi realizado pelos autores uma aferição dos valores de tensão e corrente elétrica utilizando um multímetro digital calibrado, certificando a confiabilidade dos dados computados.

Na data 12 de abril de 2019 foi feita a inserção do pendrive nos dois inversores e iniciada a coleta dos dados, o inversor foi configurado para registrar a leitura dos parâmetros elétricos em períodos de 5 segundos.

### **5.10 Processamento dos Dados coletados**

No dia 28 de abril foi realizado a retirada dos dados, e dado início ao processamento das informações coletadas. O arquivo extraído possui extensão CSV (Comma Separated Values) “valores separados por vírgulas”, esse é um arquivo texto, e permite sua utilização no software Excel do pacote Office.

Em forma de planilhas os autores recalcularam a potência medida em cada instante e converteu todas as leituras em energia, para posteriormente inserir as informações em gráficos para melhor análise dos dados.

Tabela 1 - Tabela com informações processadas com valores de energia.

Date	Time	Inverter No.	Device Type	Periode [s]	Energy [Ws]	KWh	Uac L1 [V]	Iac L1 [A]
12/04/2019	08:06:56	1	76					
12/04/2019	08:06:58	1	76					
12/04/2019	08:06:59	1	76					0,00E+00
12/04/2019	08:06:59	1	76					
12/04/2019	08:20:00	1	76	3,00E+02	810172,00	0,23	247,20	11,08
12/04/2019	08:25:00	1	76	3,00E+02	4,27E+05	0,12	245,20	5,94
12/04/2019	08:30:00	1	76	3,00E+02	4,95E+05	0,14	245,70	6,84
12/04/2019	08:35:00	1	76	3,00E+02	5,81E+05	0,16	246,80	7,98
12/04/2019	08:40:00	1	76	3,00E+02	5,07E+05	0,14	246,60	6,99
12/04/2019	08:45:00	1	76	3,00E+02	3,63E+05	0,10	245,40	5,05
12/04/2019	08:50:00	1	76	3,00E+02	4,39E+05	0,12	246,10	6,08
12/04/2019	08:55:00	1	76	3,00E+02	4,15E+05	0,12	247,90	5,70
12/04/2019	09:00:00	1	76	3,00E+02	4,80E+05	0,13	248,40	6,54
12/04/2019	09:05:00	1	76	3,00E+02	7,23E+05	0,20	248,60	9,78
12/04/2019	09:10:00	1	76	3,00E+02	1,20E+06	0,33	249,50	16,19

Fonte: Autores (2019)

### 5.11 Comparação da eficiência do sistema conectado ao rastreador solar e o sistema fixo

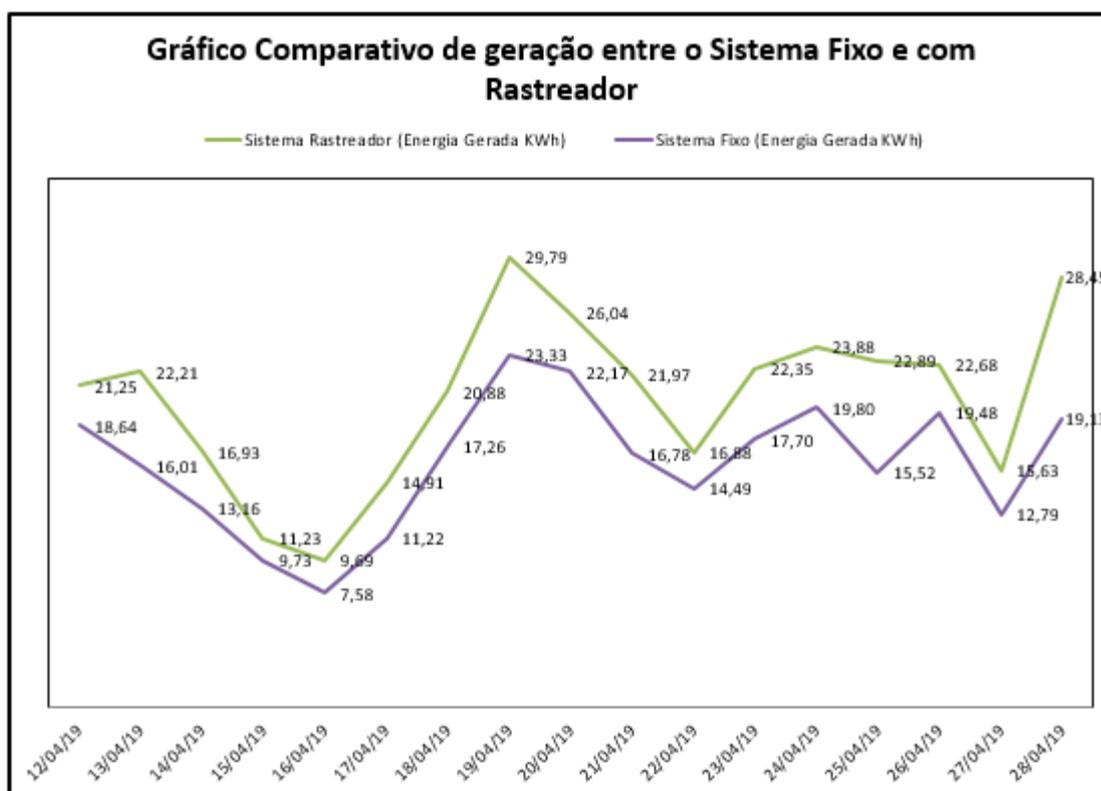
Para análise da eficiência foi calculado o valor gerado diário, e colocado em uma planilha de forma a comparar a geração entre os dois sistemas conforme demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Tabela criada para comparação entre os sistemas

Relação de Produção de Energia entre os dois Sistemas			
Dia	Sistema Rastreador (Energia Gerada KWh)	Sistema Fixo (Energia Gerada KWh)	Percentual de Produção entre o sistema Rastreador / sistema fixo(%)
12/04/19	21,25	18,64	12,27%
13/04/19	22,21	16,01	27,90%
14/04/19	16,93	13,16	22,26%
15/04/19	11,23	9,73	13,36%
16/04/19	9,69	7,58	21,82%
17/04/19	14,91	11,22	24,75%
18/04/19	20,88	17,26	17,35%
19/04/19	29,79	23,33	21,71%
20/04/19	26,04	22,17	14,85%
21/04/19	21,97	16,78	23,62%
22/04/19	16,88	14,49	14,16%
23/04/19	22,35	17,70	20,77%
24/04/19	23,88	19,80	17,08%
25/04/19	22,89	15,52	32,19%
26/04/19	22,68	19,48	14,11%
27/04/19	15,63	12,79	18,16%
28/04/19	28,45	19,13	32,77%
<b>Total Gerado no Sistema Rastreador (KWh)</b>		<b>347,66</b>	
<b>Total Gerado no Sistema Fixo (KWh)</b>		<b>274,79</b>	
<b>Diferença de Energia gerado (KWh)</b>		<b>72,87</b>	
<b>Percentual (%)</b>		<b>20,96%</b>	

Fonte: Autores (2019)

Gráfico 1 – Comparação da energia gerada entre o sistema fotovoltaico fixo e o sistema conectado ao rastreador



Fonte: Autores (2019).

Os valores calculados confirmam que o sistema conectado ao rastreador obteve dentro do período mensurado uma produção 20,96% superior ao sistema fixo, demonstrando que esse rastreador solar é uma solução para otimização da geração elétrica produzida na usina.

## 6 ANÁLISE DE VIABILIDADE DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

A análise da viabilidade de um projeto é essencial para verificação da sua atratividade. Através da utilização de técnicas é possível seleccionar o projeto mais viável para determinada situação, uma vez que o valor do investimento pode ser aplicado em outras opções com retorno financeiro diferenciado.

Por ser um assunto muito amplo, para analisar a viabilidade do projeto fotovoltaico e o emprego do rastreador solar, para esse trabalho serão utilizados os métodos de Payback Descontado, VPL (Valor Presente Líquido) e TIR (Taxa Interna de Retorno).

Para análise da viabilidade, as opções do estudo utilizando empréstimos ou financiamentos, não estarão no escopo desse trabalho.

### 6.1 Premissas para o cálculo de viabilidade

Os estudos de viabilidade desse trabalho serão realizados de forma separada para o sistema conectado ao rastreador e o sistema fixo, simulando em uma situação o sistema fotovoltaico com todos os módulos fixos e em outra situação com todos os módulos conectado ao rastreador.

A produção de energia elétrica considerada para todos os cálculos foi referenciada pelo valor projetado da usina, que é 13.000KWh por ano, é sabido que esse valor é baseado em uma média, uma vez que estão sujeitos a sofrer variações bruscas devido as condições ambientais.

Para a análise do sistema conectado ao rastreador foi acrescido o percentual calculado na seção 4.9 de 20,96%, correspondente a otimização com a utilização do rastreador.

Para realização dos cálculos da viabilidade foram utilizados dados reais atuais de mercado e valores disponibilizados pelo proprietário da usina, as informações necessárias para base de cálculos utilizadas serão:

- Investimento Inicial;
- Taxa mínima de atratividade;
- Inflação;
- Histórico de aumento anual da tarifa de energia;
- Valor tarifado pela concessionária de energia;

- Consumo de energia do sistema rastreador;
- Depreciação;
- Custos de Manutenção.

### 6.1.1 Investimento inicial

Para toda análise da viabilidade de um projeto, é primordial mensurar o custo total de implantação.

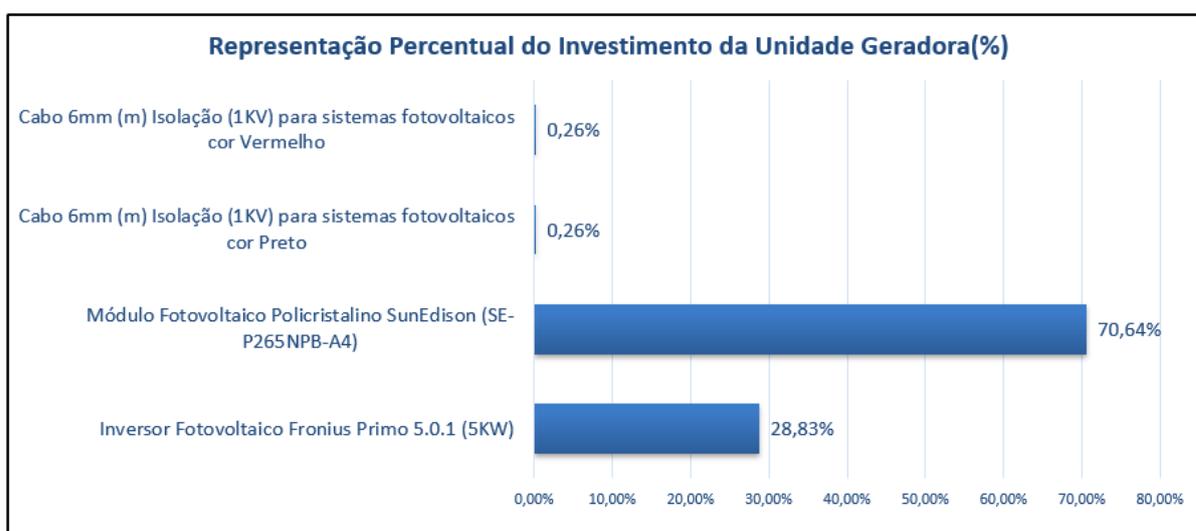
A unidade de geração fotovoltaica estudada possui o custo inicial de R\$41.620,00, dados referentes ao ano de 2015 quando foi realizada a compra de todos os equipamentos, detalhado na Tabela 3.

Tabela 3 - Estratificação do Investimento do Sistema Fotovoltaico

Investimento do Sistema Fotovoltaico			
Descrição	QIDE(unid)	Valor Unitário (R\$)	Valor Total (R\$)
Inversor Fotovoltaico Fronius Primo 5.0.1 (5KW)	2	R\$ 6.000,00	R\$ 12.000,00
Módulo Fotovoltaico Policristalino SunEdison (SE-P265NPB-A4)	40	R\$ 735,00	R\$ 29.400,00
Cabo 6mm (m) Isolação (1KV) para sistemas fotovoltaicos cor Preto	20	R\$ 5,50	R\$ 110,00
Cabo 6mm (m) Isolação (1KV) para sistemas fotovoltaicos cor Vermelho	20	R\$ 5,50	R\$ 110,00
Valor Total do Sistema Fotovoltaico (R\$)			R\$ 41.620,00

Fonte: Autores (2019)

Gráfico 2 – Representação percentual dos componentes a unidade geradora



Fonte: Autores (2019)

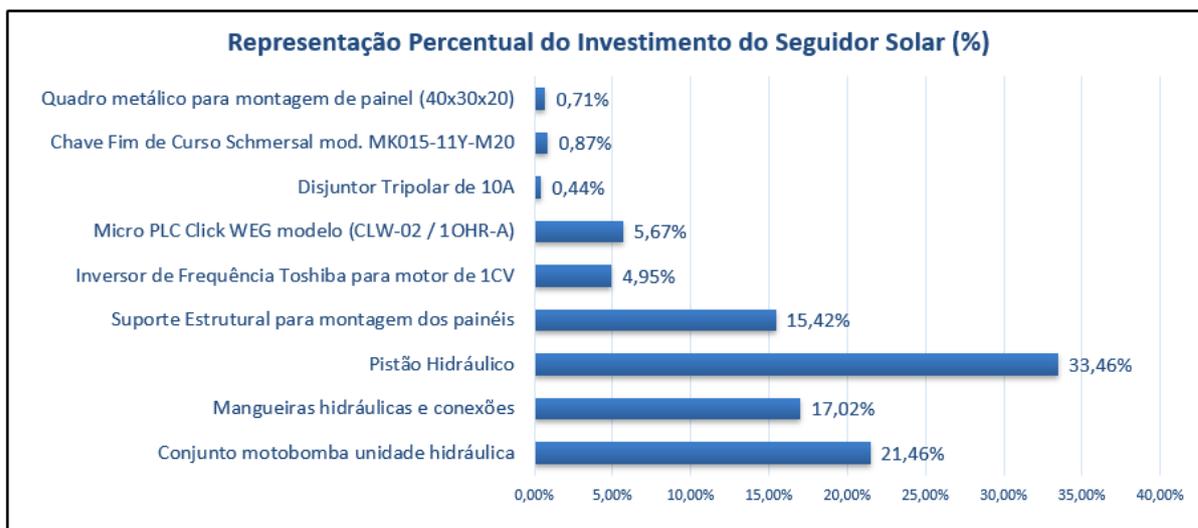
Outro custo inicial importante para análise da viabilidade foi do seguidor solar, somando um investimento de R\$13.748,00 demonstrado na Tabela 4.

Tabela 4 - Estratificação do custo inicial do Rastreador Solar

Levantamento do Investimento do Rastreador Solar			
Descrição	QIDE (unid)	Valor Unitário (R\$)	Valor Total (R\$)
Conjunto motobomba (motor trifásico 1CV) com unidade hidráulica	1	R\$ 2.950,00	R\$ 2.950,00
Mangueiras hidráulicas e conexões	1	R\$ 2.340,00	R\$ 2.340,00
Pistão Hidráulico	4	R\$ 1.150,00	R\$ 4.600,00
Suporte Estrutural para montagem dos painéis	1	R\$ 2.120,00	R\$ 2.120,00
Inversor de Frequência Toshiba para motor de 1CV	1	R\$ 680,00	R\$ 680,00
Micro PLC Click WEG modelo (CLW-02 / 1OHR-A)	1	R\$ 780,00	R\$ 780,00
Disjuntor Tripolar de 10A	1	R\$ 60,00	R\$ 60,00
Chave Fim de Curso Schmersal mod. MK015-11Y-M20	2	R\$ 60,00	R\$ 120,00
Quadro metálico para montagem de painel (40x30x20)	1	R\$ 98,00	R\$ 98,00
Valor total da Estrutura do Rastreador			R\$ 13.748,00

Fonte: Autores (2019)

Gráfico 3 - Percentual representativo dos componentes no investimento do projeto do rastreador solar



Fonte: Autores (2019)

Conforme demonstrado o custo do sistema desse modelo de rastreamento solar equivale a 33% do valor total investido do sistema fotovoltaico. Sendo os pistões hidráulicos o maior valor investido no rastreador solar, representando 33,46% do custo do projeto.

Os 40 módulos fotovoltaicos representaram 70,64% do valor investido no sistema fotovoltaico, sendo esse o equipamento no agregado de maior valor na unidade geradora.

O investimento inicial na obtenção do sistema FV fixo é caracterizado pelo valor dos componentes FV acrescido do suporte estrutural no valor de R\$2.120,00, totalizando um investimento inicial de R\$43.740,00.

### *6.1.2 Taxa mínima de atratividade*

A taxa mínima de atratividade é um valor percentual utilizado pelo investidor como referência em um projeto, representando o mínimo que se deseja receber pelo investimento. Sua especificação não é determinada por equação matemática ou por seguimento de negócio e sim proporcional ao risco do investimento. Quanto maior for o risco, mais acrescida será a taxa de atratividade pelo investidor (BORDEUAUX-RÊGO, 2010).

Na análise da viabilidade desse trabalho a taxa mínima de atratividade utilizada como referência será a taxa CDI, (Certificado de depósito Interbancário), ela será adotada pelo fato da empresa proprietária da unidade geradora fotovoltaica utilizá-la como referência em análise dos investimentos dos seus projetos, essa taxa foi criada na década de oitenta e é empregada na negociação entre instituições financeiras, dentro do mercado interbancário.

A taxa mínima de atratividade na análise da viabilidade será de 7,88%, valor médio acumulado do ano de 2017 e 2018 calculado conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Demonstração do cálculo da taxa mínima de atratividade

<b>Cálculo Reajuste Médio Anual</b>			
<b>Ano 2017</b>		<b>Ano 2018</b>	
<b>Data</b>	<b>Ajuste médio (%)</b>	<b>Data</b>	<b>Ajuste médio (%)</b>
janeiro/2017	1,08%	janeiro/2018	0,58%
fevereiro/2017	0,86%	fevereiro/2018	0,47%
março/2017	1,05%	março/2018	0,53%
abril/2017	0,79%	abril/2018	0,52%
maio/2017	0,93%	maio/2018	0,52%
junho/2017	0,81%	junho/2018	0,52%
julho/2017	0,80%	julho/2018	0,54%
agosto/2017	0,80%	agosto/2018	0,57%
setembro/2017	0,64%	setembro/2018	0,47%
outubro/2017	0,64%	outubro/2018	0,54%
novembro/2017	0,57%	novembro/2018	0,49%
dezembro/2017	0,54%	dezembro/2018	0,49%
<b>Ajustes 2017 (%)</b>	<b>9,51%</b>	<b>Média 2018 (%)</b>	<b>6,24%</b>
<b>Média dos dois últimos anos (%)</b>			<b>7,88%</b>

Fonte: adaptado de: <https://abacuslimid.com/tag/taxa-cdi-hoje/>

### 6.1.3 Consumo de energia do sistema seguidor solar

O consumo de energia do seguidor solar foi calculado levando como referência o tempo de atuação mensal do sistema rastreador e a potência de todos os equipamentos envolvidos no projeto conforme demonstrado nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6 - Relação do tempo de atuação dos componentes do rastreador solar

<b>Cálculo do tempo de funcionamento do sistema de rastreamento solar</b>		
<b>Descrição</b>	<b>Funcionamento (segundos)</b>	<b>Funcionamento em (horas)</b>
<b>Tempo/dia de funcionamento no rastreamento (18x5seg)</b>	90	00:01:30
<b>Tempo/dia de funcionamento para retornar posição inicial (120seg)</b>	120	00:02:00
<b>Tempo de funcionamento no dia</b>	210	00:03:30
<b>Tempo de funcionamento no mês</b>	6300	01:45:00
<b>Hora de funcionameno mensal</b>	<b>1,75</b>	

Fonte: Autores (2019)

Tabela 7 - Relação das potências dos equipamentos do rastreador solar

Levantamento da Potência Ativa dos Equipamentos empregados no rastreador Solar		
Descrição	QTDE (unid)	Potência (KW)
Motor Bonfiglioli Trifásico da Bomba Hidráulica	1	0,75
Bobina solenóide 220V (5W)	9	0,045
Micro PLC Click WEG modelo (CLW-02 / 1OHR-A)	1	0,0002431
Inversor de frequência Toshiba VFNC3 para motor de 1CV	1	0,75
<b>Cálculo do Consumo de energia (KWh)</b>		<b>1,5452431</b>

Fonte: Autores (2019)

O valor da tarifa de energia utilizada para esse trabalho, foi referente ao mês de fevereiro de 2019 no valor de R\$0,5606528/KWh.

Figura 34 - Valor tarifado na instalação pela concessionária CEMIG

Valores Faturados			
Descrição	Quantidade	Tarifa/Preço (R\$)	Valor (R\$)
Energia Elétrica kWh	853	0,56065238	478,22
Dif. Custo Disponib. Res. 482	30	0,56065238	16,80
Energia Injetada kWh	853	0,56065238	-478,22
Encargos/Cobranças			
Subsídio tarifa líquida GD			150,17
Dif. recálculo tarifa integral			212,14
Saldo para o próximo mês			1.560,32
Abatimentos e Devoluções			

Fonte: Autores (2019)

O consumo mensal de energia do rastreador calculado foi de R\$1,51, resultado do produto da potência com o tempo de funcionamento mensal dos equipamentos e o valor tarifado na instalação conforme demonstrado na Tabela 8.

Tabela 8 - Estratificação do cálculo do consumo de energia do seguidor solar

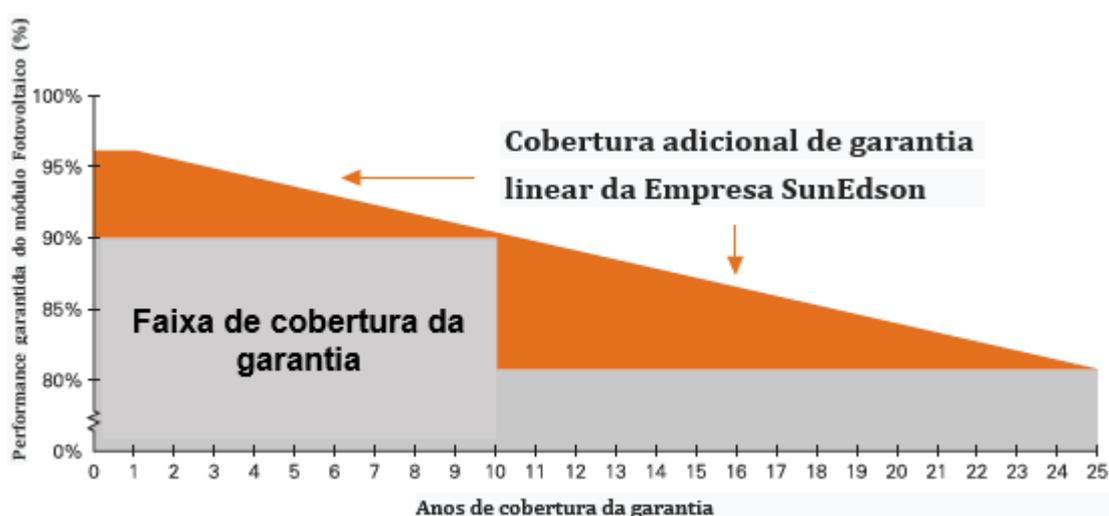
Cálculo do Consumo de Energia	
Potência Total do Rastreador (KW)	1,5452431
Tempo de Funcionamento mensal do Rastreador (h)	1,75
Energia Consumida mensal (KWh)	2,704175425
Valor Energia elétrica (RS/KWh)	RS 0,56065238
Valor consumido de Energia Elétrica mensal (RS)	RS 1,51610239

Fonte: Autores (2019)

#### 6.1.4 Perdas da eficiência dos módulos fotovoltaicos utilizados no projeto

Os módulos Sunedison utilizados no projeto possuem uma perda de eficiência ao longo dos anos. A fabricante estipula uma perda de rendimento de 3,5% no primeiro ano e um valor de aproximadamente 0,7% nos anos subsequentes, chegando no 25º ano a 81% da potência nominal (SUNEDISON, 2015).

Gráfico 4 - Rendimento dos módulos fotovoltaicos utilizados na unidade geradora fotovoltaica



Fonte: Sunedison (2015)

#### 6.1.5 Cálculo da depreciação da unidade geradora

Conforme demonstrado na seção anterior, os módulos tem uma significativa perda de rendimentos ao longo dos anos, chegando no 25º ano a 81% de sua eficiência nominal que já é baixa, de 16,2%, valor demonstrado na Figura 22 desse trabalho.

O custo dos módulos fotovoltaicos no projeto apresentado na seção 5.1.1 representa 70% do valor do investimento. Diante desses fatores os cálculos da depreciação do sistema fotovoltaico foram mensurados levando em consideração uma vida útil do sistema de 25 anos, período definido como fim da vida útil dos módulos.

Os inversores fotovoltaicos possuem um período de garantia de 7 anos oferecida pelo fabricante. Para o cálculo da depreciação, baseado nas informações

históricas coletadas no empreendimento da usina fotovoltaica com esses equipamentos, os autores para a análise da depreciação, assumiram de maneira conservadora que a vida útil dos inversores fotovoltaicos seria de 10 anos, ou seja, nesse período será necessário a troca desses equipamentos.

Conforme demonstrado nas Tabelas 9 e 10, as análises da depreciação foram feitas separadamente para o sistema fotovoltaico fixo e o sistema fotovoltaico com rastreador, esse fato se deu devido a diferenciação dos equipamentos empregados em ambos os projetos.

Tabela 9 - Cálculo da depreciação do sistema fotovoltaico com rastreador

<b>Cálculo da depreciação Anual do Sistema Fotovoltaico com Rastreador Solar</b>				
<b>Descrição</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor Unitário (R\$)</b>	<b>Depreciação (anos)</b>	<b>Valor Depreciado (R\$)</b>
Inversor Fotovoltaico Fronius Primo 5.0.1 (5KW)	2	R\$ 6.000,00	10	R\$ 1.200,00
Módulo Fotovoltaico Policristalino SunEdison (SE-P265NPB-A4)	40	R\$ 735,00	25	R\$ 1.176,00
Cabo 6mm (m) Isolação (1KV) para sistemas fotovoltaicos cor Preto	20	R\$ 5,50	25	R\$ 4,40
Cabo 6mm (m) Isolação (1KV) para sistemas fotovoltaicos cor Vermelho	20	R\$ 5,50	25	R\$ 4,40
Conjunto motobomba (motor trifásico 1CV) com unidade hidráulica	1	R\$ 2.950,00	25	R\$ 118,00
Mangueiras hidráulicas e conexões	1	R\$ 2.340,00	25	R\$ 93,60
Pistão Hidráulico	4	R\$ 1.150,00	25	R\$ 184,00
Suporte Estrutural para montagem dos painéis	1	R\$ 2.120,00	25	R\$ 84,80
Inversor de Frequência Toshiba para motor de 1CV	1	R\$ 680,00	25	R\$ 27,20
Micro PLC Click WEG modelo (CLW-02 / 1OHR-A)	1	R\$ 780,00	25	R\$ 31,20
Disjuntor Tripolar de 10A	1	R\$ 60,00	25	R\$ 2,40
Chave Fim de Curso Schmersal mod. MK015-11Y-M20	2	R\$ 60,00	5	R\$ 24,00
Quadro metálico para montagem de painel (40x30x20)	1	R\$ 98,00	25	R\$ 3,92
<b>Valor da Depreciação do Sistema Anual (R\$)</b>				<b>R\$ 2.953,92</b>

Fonte: Autores (2019)

Tabela 10 - Cálculo da depreciação anual do sistema fotovoltaico fixo

<b>Cálculo da depreciação Anual do Sistema Fotovoltaico Fixo</b>				
<b>Descrição</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor Unitário (R\$)</b>	<b>Depreciação (anos)</b>	<b>Valor Depreciado (R\$)</b>
Inversor Fotovoltaico Fronius Primo 5.0.1 (5KW)	2	R\$ 6.000,00	10	R\$ 1.200
Módulo Fotovoltaico Policristalino SunEdison (SE-P265NPB-A4)	40	R\$ 735,00	25	R\$ 1.176
Cabo 6mm (m) Isolação (1KV) para sistemas fotovoltaicos cor Preto	20	R\$ 5,50	25	R\$ 4
Cabo 6mm (m) Isolação (1KV) para sistemas fotovoltaicos cor Vermelho	20	R\$ 5,50	25	R\$ 4
<b>Valor da Depreciação do Sistema Anual (R\$)</b>				<b>R\$ 2.384,80</b>

Fonte: Autores (2019)

De acordo com o estratificado, para análise da viabilidade será admitido um valor de depreciação anual para o sistema fotovoltaico fixo de R\$2.384,80 e para o sistema conectado ao rastreador solar R\$2.953,92.

### 6.1.6 Custos com manutenções

Um sistema fotovoltaico necessita de Manutenções preventivas ao longo do ano para manter uma eficiência dentro dos valores projetados de geração. Para esse trabalho foi feito um histórico dos custos junto a unidade geradora e foi definida um valor de R\$600,00 para o sistema fotovoltaico com rastreador e um custo anual de 400,00 para o sistema fotovoltaico fixo.

Esses custos são referentes a manutenção da estrutura, trocas de óleos do sistema hidráulico, limpezas dos módulos fotovoltaicos, e reaperto das conexões que são realizadas ao longo do ano conforme apresentada nas Tabelas 11 e 12.

Tabela 11 - Custos com manutenção do sistema fotovoltaico com rastreador

<b>Custo de Manutenção Anual Sistema Fotovoltaico com Rastreador</b>	
<b>Descrição do Custo</b>	<b>Valor</b>
Limpeza das Placas a cada 4 meses	R\$ 300,00
Troca de Óleo do circuito hidráulico (5 litros a cada 2 anos) + custo mão obra	R\$ 100,00
Custo Manutenção Preventiva + mão de obra (Manutenção semestral) (reaperto de Conexão)	R\$ 100,00
Pintura da Estrutura (a cada 5 anos aproximadamente) + mão de obra	R\$ 100,00
<b>Custo anual de manutenção do Sistema</b>	<b>R\$ 600,00</b>

Fonte: Autores (2019)

Tabela 12 - Custos de manutenção do sistema fotovoltaico com módulos fixos

<b>Custo de Manutenção Anual Sistema Fotovoltaico com Módulos Fixos</b>	
<b>Descrição do Custo</b>	<b>Valor</b>
Limpeza das Placas a cada 4 meses	R\$ 300,00
Pintura da Estrutura (a cada 5 anos aproximadamente) + mão de obra	R\$ 100,00
<b>Custo anual de manutenção do Sistema</b>	<b>R\$ 400,00</b>

Fonte: Autores (2019)

### 6.1.7 Outras taxas consideradas na análise de viabilidade

Na análise da viabilidade de um sistema de geração a inflação e os constantes aumentos anuais na tarifa de energia devem ser estimadas, para esse estudo foi considerado uma taxa de inflação de 6,01%, referente a média da inflação anual dos últimos cinco anos, conforme apresentado na Figuras 39 e 40.

Figura 35 - Inflação histórica Brasil (IPC) – por ano

inflação anual (Dez. a Dez.)	inflação
<a href="#">IPC Brasil 2018</a>	3,75 %
<a href="#">IPC Brasil 2017</a>	2,95 %
<a href="#">IPC Brasil 2016</a>	6,29 %
<a href="#">IPC Brasil 2015</a>	10,67 %
<a href="#">IPC Brasil 2014</a>	6,41 %
<a href="#">IPC Brasil 2013</a>	5,91 %
<a href="#">IPC Brasil 2012</a>	5,84 %
<a href="#">IPC Brasil 2011</a>	6,50 %
<a href="#">IPC Brasil 2010</a>	5,91 %
<a href="#">IPC Brasil 2009</a>	4,31 %

Fonte: Inflation (2019)

Os aumentos anuais das tarifas de energia da concessionária CEMIG, foi levantada com base no histórico a partir do ano de 2013. Para o presente trabalho será considerando uma taxa de crescimento anual do valor da fatura de 7,11%.

Figura 36 - Histórico de reajustes da CEMIG

Histórico de Reajustes / Revisão Tarifária			
2013 a 2018			
DATA	AJUSTE MÉDIO	RESOLUÇÃO HOMOLOGATÓRIA	MOTIVO
24/01/2013	-18,94	Resolução 1.422	Revisão Extraordinária
05/04/2013	3,06%	Resolução 1.507	Revisão Periódica
07/04/2014	16,33%	Resolução 1.700	Reajuste Tarifário
27/02/2015	28,80%	Resolução 1.858	Revisão Extraordinária
07/04/2015	7,07%	Resolução 1.872	Reajuste Tarifário
24/05/2016	3,78%	Resolução 2.076	Reajuste Tarifário
23/05/2017	-10,66%	Resolução 2.248	Reajuste Tarifário
22/05/2018	23,19%	Resolução 2.396	Revisão Periódica

Fonte: adaptado de: <https://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Paginas/Historico.aspx>

Tabela 13 - Demonstrativo do cálculo da taxa de reajuste anual

Cálculo Reajuste médio	
Ano	Ajuste (%)
2013	-7,94
2014	16,33
2015	17,94
2016	3,78
2017	-10,66
2018	23,19
<b>Média anual de reajuste (%)</b>	<b>7,11</b>

Fonte: Autores (2019)

## 6.2 Análise de investimento utilizando o método payback descontado

O payback descontado é o tempo do retorno do investimento inicial, levando em consideração uma taxa mínima de atratividade, e os rendimentos futuros líquidos ao longo do tempo.

A análise do payback descontado é aceita quando o tempo em que se paga o investimento inicial é menor ou igual ao tempo estipulado pelo patrocinador do projeto (BORDEUAUX-RÊGO, 2010).

Os cálculos são eficientes para auxiliar a tomada de decisão e são realizados através da equação:

$$FCC(t) = -I + \sum_{j=1}^t \frac{(R_j - C_j)}{(1+i)^j} \quad (1)$$

Onde:

- $FCC(t)$  = fluxo de caixa descontado ao valor presente acumulado até o período "t";
- $I$  = Investimento inicial;
- $R_j$  = receita do ano  $j$ ;
- $C_j$  = custo proveniente do ano  $j$ ;
- $j$  = índice genérico que representa os períodos.

Os cálculos do payback descontado foram feitos com auxílio do software Excel. Foi realizado primeiramente a estratificação do fluxo de caixa, levando em consideração o investimento inicial, os custos do sistema, as taxas (Inflação e aumento tarifários anuais) e os ganhos com a geração de energia elétrica ao longo

dos 25 anos estipulados de vida útil desse projeto conforme demonstrado nas Tabelas 14 e 15.

Tabela 14 - Estratificação do fluxo de caixa dos dois primeiros anos do projeto do sistema fotovoltaico com rastreador solar

Fluxo de Caixa para os dois Primeiros anos do sistema fotovoltaico com rastreador solar		
Descrição	Ano 1	Ano 2
	2019	2020
Energia Gerada (R\$)+Aumento anual da tarifa	R\$ 8.805,89	R\$ 9.431,11
Perda de Rendimento (R\$)	R\$ 94,31	R\$ 101,01
Custo com Manutenção (R\$) + Inflação	R\$ 600,00	R\$ 636,08
Consumo de Energia do Rastreador (R\$) + Aumento anual da tarifa	R\$ 18,19	R\$ 19,48
Depreciação Anual (R\$)	R\$ 2.953,92	R\$ 2.953,92
<b>Fluxo de Caixa (R\$)</b>	<b>R\$ 5.139,46</b>	<b>R\$ 5.720,61</b>

Fonte: Autores (2019)

Tabela 15 - Estratificação do fluxo de caixa dos dois primeiros anos do projeto do sistema fotovoltaico

Fluxo de caixa do sistema fotovoltaico fixo para os dois primeiros anos do Projeto		
Descrição	Ano 1	Ano 2
	2019	2020
Energia Gerada (R\$)+Aumento anual da tarifa	R\$ 7.280,00	R\$ 7.796,88
Perda de Rendimento (R\$)	R\$ 77,97	R\$ 83,50
Custo com Manutenção (R\$) + Inflação (Inclusão limpeza das placas)	R\$ 400,00	R\$ 424,06
Consumo de Energia do Rastreador (R\$) + Aumento anual da tarifa	R\$ -	R\$ -
Depreciação Anual (R\$)	R\$ 2.384,80	R\$ 2.384,80
<b>Fluxo de caixa (R\$)</b>	<b>R\$ 4.417,23</b>	<b>R\$ 4.904,52</b>

Fonte: Autores (2019)

O fluxo de caixa apresentado nas Tabelas 14 e 15 foram feitos para os 25 anos de vida útil do projeto. Essa planilha foi utilizada como referência para todos os métodos utilizados nesse trabalho para análise da viabilidade.

Gráfico 5 - Demonstrativo do retorno do investimento para o sistema fotovoltaico conectado ao rastreador solar



Fonte: Autores (2019)

Gráfico 6 - Demonstrativo do retorno do investimento para o sistema fotovoltaico com estrutura fixa



Fonte: Autores (2019)

O payback descontado calculado para o sistema fotovoltaico com rastreador foi de 7 anos e 6 meses. Já o sistema fotovoltaico fixo o retorno do investimento se dará em 7 anos e 10 meses.

Apesar de possuir um custo operacional e investimento inicial maior que o sistema convencional fixo, o retorno do investimento desse modelo de rastreador solar

em uma planta fotovoltaica é recompensado pelo ganho da produção de energia anual que se pode obter.

### 6.3 Análise de Investimento utilizando o método do valor presente líquido

O Valor Presente Líquido – VPL é uma técnica de análise de viabilidade mais sofisticada que o payback descontado, muito utilizada por gestores e administradores financeiros. Essa técnica tem o foco de auxiliar na tomada de decisões na necessidade de aprovação de um projeto.

Brasil (2002, p.08) cita que “o critério do valor presente líquido fornece a indicação a respeito do potencial de criação de valor de um investimento”. Assim pode-se dizer que o VPL é uma técnica que traz para o presente todos os lucros futuros que esse projeto pode retornar ao realizar seu investimento.

É importante destacar que é necessário para interpretar com facilidade e clareza os resultados, trazer todos os fluxos de caixa para o valor presente, utilizando uma taxa de desconto e então, subtraí-los do montante inicial aplicado ao projeto, (BORDEUAUX-RÊGO, 2010).

O Valor Presente Líquido é obtido a partir da formula:

$$VPL = -I + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+r)^t} + \frac{VR}{(1+r)^n} \quad (2)$$

Onde:

- FC<sub>t</sub> = Fluxo de caixa líquida na data “t”;
- I = Investimento inicial;
- r = Custo de capital definido pela empresa;
- VR = Valor residual do projeto ao final do período de análise.

Para avaliar se o projeto pode ser aceito como viável utilizando o método VPL, analisa-se o resultado da equação da seguinte forma: se o valor encontrado for maior que zero, o projeto vai trazer um retorno financeiro e se torna viável, caso o resultado seja igual a zero, ele se torna indiferente, ou seja, não irá ser um projeto que retornará um lucro, mas também não dará prejuízos, caso o valor do VPL seja menor que zero, consequentemente o projeto torna-se inviável.

Para analisar o projeto do rastreador e do sistema fotovoltaico fixo através do método valor presente líquido, foi utilizado uma planilha estratificando os fluxos de caixas líquidos dos vinte e cinco anos de vida útil de ambos os projetos e calculado conforme tabela 16 e 17.

Tabela 16 - Cálculo da Viabilidade do Sistema FV conectado ao rastreador

<i>Base de Cálculo para Análise de Investimento utilizando VPL</i>	
<i>Investimento Inicial</i>	<b>RS 55.368,00</b>
<i>Taxa de atratividade (CDI)</i>	<b>7,88%</b>
<i>Aumento da Energia Anual</i>	<b>7,10%</b>
<i>Inflação (%)</i>	<b>6,01%</b>
<b><i>VPL Calculado</i></b>	<b>RS 86.893,33</b>

Fonte: Autores (2019)

Tabela 17 - Cálculo da Viabilidade do Sistema FV com estrutura fixa

<i>Base de Cálculo para Análise de Investimento utilizando VPL</i>	
<i>Investimento Inicial</i>	<b>RS 43.740,00</b>
<i>Taxa de atratividade (CDI)</i>	<b>7,88%</b>
<i>Aumento da Energia Anual</i>	<b>7,10%</b>
<i>Inflação (%)</i>	<b>6,01%</b>
<b><i>VPL Calculado</i></b>	<b>RS 76.628,55</b>

Fonte: Autores (2019)

Utilizando o método VPL para análise da viabilidade dos dois sistemas FV, foi verificado que as duas UFV são viáveis, pois possuem um valor presente líquido maior que zero, porém, a usina FV que possui os módulos conectado ao rastreador, no final da vida útil de 25 anos retornará ao investidor um valor de R\$10.264,78 superior ao sistema fixo.

#### **6.4 Análise de Investimento utilizando o método da taxa interna de retorno**

Taxa Interna de Retorno (TIR) é um método de análise de viabilidade utilizado após o estudo do VPL, isso se deve ao fato dessa técnica utilizar o resultado do VPL como parâmetro, ou seja, a TIR é a taxa de atratividade quando o VPL é igual a zero.

Basicamente esse método sintetiza os ganhos do projeto em um único valor. É um método que apesar de ser muito complexo, é muito utilizado pelos investidores e apresenta muita confiabilidade (BORDEUAUX-RÊGO, 2010).

Aceita-se um projeto se a Taxa Interna de Retorno for maior que a taxa mínima de atratividade, a fórmula para encontrar a TIR de um projeto é dada através da fórmula:

$$FCo(t) = \sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1+i)^j} \quad (3)$$

Onde:

- FC<sub>j</sub> = fluxo de caixa de ordem j;
- i = Taxa Interna de Retorno;
- FCo = Investimento Inicial;

Para analisar o projeto do rastreador e do sistema fotovoltaico fixo através do método da TIR (Taxa Interna de Retorno), foi utilizado uma planilha estratificando os fluxos de caixas líquidos dos vinte e cinco anos de vida útil de ambos os projetos e calculado conforme tabela 18 e 19.

Tabela 18 - Cálculo da Viabilidade do Sistema conectado ao Rastreador (Método da Taxa Interna de Retorno (TIR))

<i>Base de Cálculo para Análise de Investimento utilizando a TIR</i>	
<i>Investimento Inicial</i>	<b>RS 55.368,00</b>
<i>Taxa de atratividade (CDI)</i>	<b>7,88%</b>
<i>Aumento da Energia Anual</i>	<b>7,10%</b>
<i>Inflação (%)</i>	<b>6,01%</b>
<b><i>Taxa Interna de Retorno Calculada</i></b>	<b>17,22%</b>

Fonte: Autores (2019)

Tabela 19 - Cálculo da Viabilidade do Sistema fotovoltaico fixo (Método da Taxa Interna de Retorno (TIR))

<i>Base de Cálculo para Análise de Investimento utilizando a TIR</i>	
<i>Investimento Inicial</i>	<b>RS 55.368,00</b>
<i>Taxa de atratividade (CDI)</i>	<b>7,88%</b>
<i>Aumento da Energia Anual</i>	<b>7,10%</b>
<i>Inflação (%)</i>	<b>6,01%</b>
<b><i>Taxa Interna de Retorno Calculada</i></b>	<b>18,14%</b>

Fonte: Autores (2019)

De acordo com a teoria da análise da viabilidade utilizando o método da Taxa Interna de Retorno (TIR), para um investimento se tornar viável é necessário que o resultado encontrado seja superior a taxa mínima de atratividade, portanto os dois sistemas são viáveis analisando pela TIR, uma vez que na análise as taxas encontradas foram 17,22% e 18,14% para os sistemas FV com rastreador e fixo respectivamente valores superiores a taxa mínima de atratividade adotada de 7,88%.

Ao realizar a comparação de viabilidade entre a UFV com rastreador e a fixa, pelo método da TIR, o sistema rastreador se confirmou mais viável que o fixo devido a Taxa Interna de Retorno encontrada ser um valor de aproximadamente 5% inferior.

## 7 CONCLUSÃO

A energia fotovoltaica atualmente desperta um vasto interesse nos investidores devido ao enorme potencial dos níveis de irradiação solar do território brasileiro. Porém, esse tipo de investimento esbarra em várias questões de viabilidade, devido dúvidas do funcionamento e da falta de informações baseados em plantas fotovoltaicas reais em atividades no território nacional.

Neste contexto, esse trabalho foi desenvolvido com o objetivo de demonstrar as características funcionais de uma usina fotovoltaica e a utilização de sistemas de rastreamentos solares na otimização da produção de energia elétrica, propondo contabilizar em uma usina de geração de energia, valores concretos de custos e ganhos para serem disponibilizados como meio de pesquisa.

Outro fato importante é a contribuição em relação as informações que poderão ser disponibilizadas para a comunidade estudantil, que detém poucas oportunidades de desenvolver esse tipo de trabalho em campo, devido às restrições de acesso a uma planta FV em funcionamento ou relativo ao baixo número de usinas que possuem rastreador solar no território nacional.

As vantagens apresentadas durante o desenvolvimento e ao final deste estudo apontam que a utilização da energia solar para obtenção da eletricidade através do efeito fotovoltaico é muito positiva, tanto para diversificar a matriz energética nacional quanto para obtenção de ganhos financeiros ao investidor e principalmente por utilizar recursos advindos do sol, uma fonte sustentável e inesgotável de energia.

Apesar do modelo do rastreador estudado possuir limitações quanto à forma de rastreamento e não ser o modelo de maior eficiência ou menor custo disponibilizado no mercado, possibilitou uma análise detalhada de um sistema de geração fotovoltaico real que utiliza um seguidor de radiação.

Os dados coletados na usina instalada na cidade de Alvinópolis-MG, no período de 12 de abril de 2019 à 18 de abril do mesmo ano, demonstram que com a utilização do modelo do rastreador estudado, foi possível obter um ganho de produção 20,96% superior ao sistema convencional.

Em termos de viabilidade, tanto o sistema FV convencional, quanto ao que utiliza rastreador, demonstraram uma boa oportunidade de investimento. Os dois sistemas apresentaram um retorno de investimento menor que oito anos, para uma vida útil do projeto de 25 anos. Vale lembrar que a instalação estudada é tarifada na

modalidade rural B2 (Rural), cujo valor é aproximadamente 25% menor que a cobrada na classe residencial, por exemplo, possibilitando em outros modelos de tarifações um retorno de investimento em períodos ainda menores.

O sistema fotovoltaico convencional demandou um investimento inicial de R\$43.740,00, já o sistema conectado ao rastreador R\$55.368,00, apesar de possuir um percentual 21% maior e um custo operacional superior, o ganho da produção de energia da planta fotovoltaica utilizando o rastreador solar, reduziu o retorno do investimento em 4 meses se comparado ao sistema fixo.

Utilizando os métodos payback descontado, VPL e TIR a unidade geradora com rastreador solar, apresentou uma viabilidade superior que a usina fotovoltaica fixa inclinada no melhor ângulo de radiação, confirmando que o investimento em um sistema rastreador é financeiramente viável.

Pode-se concluir através desse trabalho que apesar de ainda possuir um elevado custo de implantação, aproximadamente R\$55.368,00 o investimento em geração fotovoltaica para uma instalação que possui um consumo médio de 13.000KWh por ano, é atraente, permite além do retorno do investimento, obter uma boa rentabilidade ao longo da vida útil.

A utilização do rastreador, ainda que não seja muito utilizado em instalações fotovoltaicas, através dos cálculos de viabilidade apresentado nesse trabalho também demonstrou ser uma ótima opção para otimização de uma planta, o aumento da produção de energia de 20,96% maior que o sistema convencional, possibilita o retorno total do investimento um período menor que o sistema convencional mesmo sendo necessário um desembolso de R\$11.628,00 superior.

Para trabalhos futuros, fica a oportunidade de modificação do funcionamento do rastreador com inserção de sensores para detecção de nebulosidade e realização de análise da viabilidade do uso desse modelo de rastreamento.

## REFERÊNCIAS

ACEVEDO, A. M., **CAN WE IMPROVE THE RECORD EFFICIENCY OF CDS/CDTE SOLAR CELLS?, SOLAR ENERGY MATERIALS AND SOLAR CELLS** v 90 p 2213-2220, 2006.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 03 de Fevereiro de 2019.

ANJOS, T. A. dos.; **A DIFERENÇA ENTRE RADIAÇÃO E IRRADIAÇÃO**. (2014). Disponível em: <<https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/a-diferenca-entre-radiacao-irradiacao.htm>>. Acessado em 09 Fevereiro de 2019.

BARBOSA, M. F. **PROJETO DE UM RASTREADOR SOLAR ATIVO DE BAIXO CUSTO PARA PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**. Artigo científico (Mestrado em Engenharia Mecânica) – UNESP, Guaratinguetá, 2010.

BOUDEAUX-RÊGO, Ricardo. **VIABILIDADE ECONÔMICA – FINANCEIRA DE PROJETOS**. Rio de Janeiro, 2010.

BLUESOL (2016). **OS SISTEMAS DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA**. Disponível em: <<http://programaintegradoronline.com.br/wp-content/uploads/2016/03/Livro-Digital-de-Introdu%C3%A7%C3%A3o-aos-Sistemas-Solares-novo.pdf>>. Acessado em 09 de Abril de 2019.

CABRAL, I. de S.; TORRES, A. C.; SENNA, P. R. **ENERGIA SOLAR – ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE BRASIL E ALEMANHA**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 4, Salvador, 2013.

CARVALHO, D. R. **DESENVOLVIMENTO DE UM RASTREADOR SOLAR BIAxIAL**. Dissertação de mestrado apresentada à Universidade Federal de Viçosa – Engenharia Agrícola – Viçosa, 2011.

CASTRO R. M. G., **ENERGIAS RENOVÁVEIS E PRODUÇÃO DESCENTRALIZADA: INTRODUÇÃO A ENERGIA FOTOVOLTAICA**, Universidade Técnica de Lisboa, 2002.



HEREDIA, I. L.; MORENO, J. M.; MAGALHAES, P. H.; CERVANTES, R.; QUÉMÉRÉ, G.; LAURENT, O.; **INSPIRA'S CPV SUN TRACKING (CONCENTRATOR PHOTOVOLTAICS)**. Springer; p. 221–51, 2007.

HUANG, B. J.; DING, W. L.; HUANG, Y. C. **LONG-TERM FIELD TEST OF SOLAR PV POWER GENERATION USING ONE-AXIS 3-POSITION SUN TRACKER**. **SOLAR ENERGY**, 2011 (doi:10.1016/j.solener.2011.05.001).

INFLATION.EU (Brasil). **Tabela Inflação anual Brasil (IPC)**. [S. l.], 2019. Disponível em: <https://pt.inflation.eu/taxas-de-inflacao/brasil/inflacao-historica/pc-inflacao-brasil.aspx>. Acesso em: 23 junho de 2019.

JESÚS, P. VARA; JUSTO, R. CALVO; FRANCISCO, J. GÓMEZ GIL; MIGUEL, MARTÍN. **A REVIEW OF SOLAR TRACKER PATENTS IN SPAIN**. Proceedings of the 3rd wseas int. conf. on renewable energy sources, Junho 2009.

KVASZNICZA, Z; ELMER, G. **OPTIMIZING SOLAR TRACKING SYSTEMS FOR SOLAR CELLS**, The 4th Serbian–Hungarian joint symposium on intelligent systems Subotica, Serbia, September 29–30 (2006).

LIRA, J. R. V. **DESENVOLVIMENTO DE UM RASTREADOR SOLAR DO TIPO POLAR COM AJUSTE DO ÂNGULO DE INCLINAÇÃO**. Dissertação de mestrado apresentada à Universidade Federal do Rio Grande do Norte – Engenharia Elétrica e de Computação – Natal, 2014.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Energia Solar no Brasil e Mundo Ano de referência – 2016**. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents>>. Acesso em: 21 abril de 2018.

NETO, E. P.; SILVA, G. J. P. da. **PROTÓTIPO DE UM RASTREADOR SOLAR ATIVO DE UM EIXO**. Monografia apresentada ao Instituto Federal Fluminense Campus Campos-Centro – Engenharia de Controle e Automação – Campos de Goytacazes, 2010.

PEREIRA, F. **GUIA DE MANUTENÇÃO DE INSTALAÇÕES FOTOVOLTAICAS**. 1ª Edição. Ed. Anduriña: Publindústria Edições Técnicas, 2012.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual De Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos** - CEPEL - CRESESB. Rio de Janeiro RJ: 2014. 529 p. Disponível em:  
[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual\\_de\\_Engenharia\\_FV\\_2014.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf). Acesso em: 01 de maio de 2019.

PINTO, C. **ENERGIA SOLAR**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2015. Disponível em:  
<[https://paginas.fe.up.pt/~projfeup/submit\\_14\\_15/uploads/relat\\_1MIEEC03\\_1.pdf](https://paginas.fe.up.pt/~projfeup/submit_14_15/uploads/relat_1MIEEC03_1.pdf)>. Acesso em: 22 de novembro de 2018.

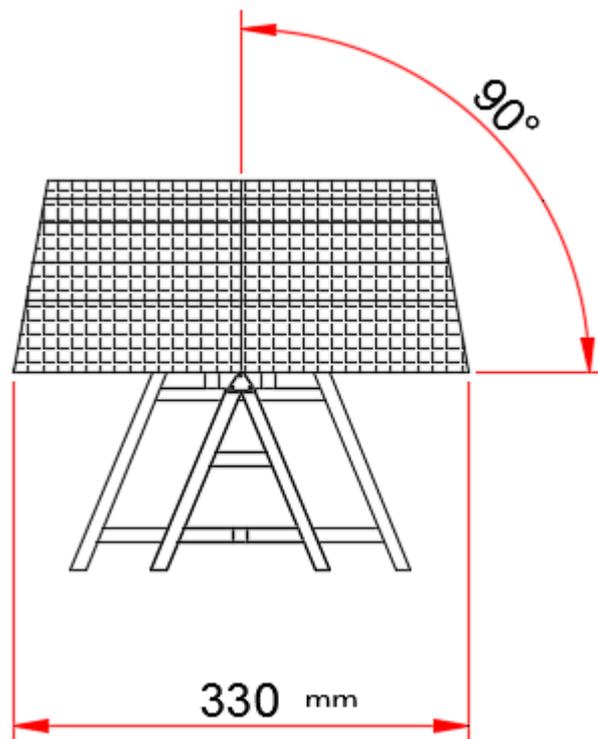
PORTAL SOLAR. **TIPOS DE PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO**. Disponível em:  
<<https://www.portalsolar.com.br/tipos-de-painel-solar-fotovoltaico.html> > Acesso em 22 de Outubro de 2018.

SUNEDISON. **MANUALSILVANTIS® F-SERIES: 255W TO 275W 60-CELL HIGH WATTAGE MODULES**. A SunEdison Company. Singapura (2015).

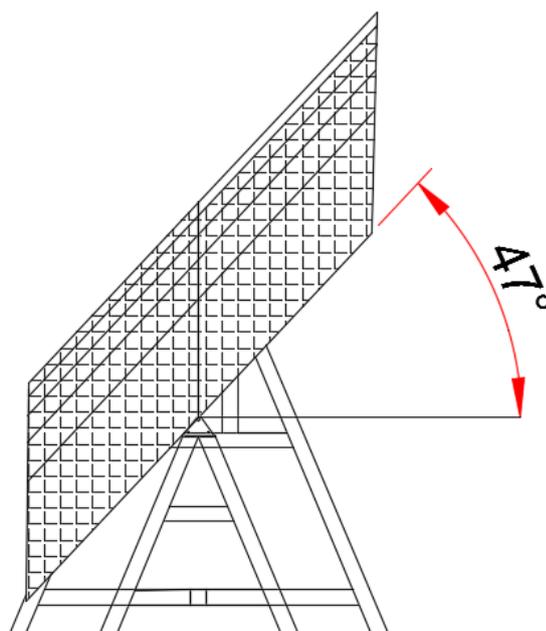
TREVELIN, F. C. **ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MÉTODOS DE RASTREAMENTO SOLAR APLICADOS A SISTEMA FOTOVOLTAICOS**. Trabalho de conclusão de curso apresentado à Escola de Engenharia de São Carlos – Engenharia elétrica com ênfase em eletrônica – São Carlos, 2014.

## ANEXOS

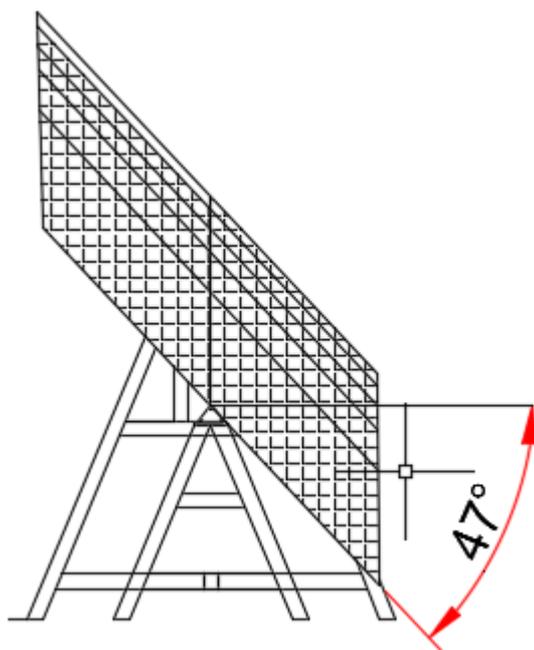
Anexo A: Posicionamento dos painéis 0° sentido Leste-Oeste



Anexo B: Posicionamento angular Inicial da estrutura do rastreador

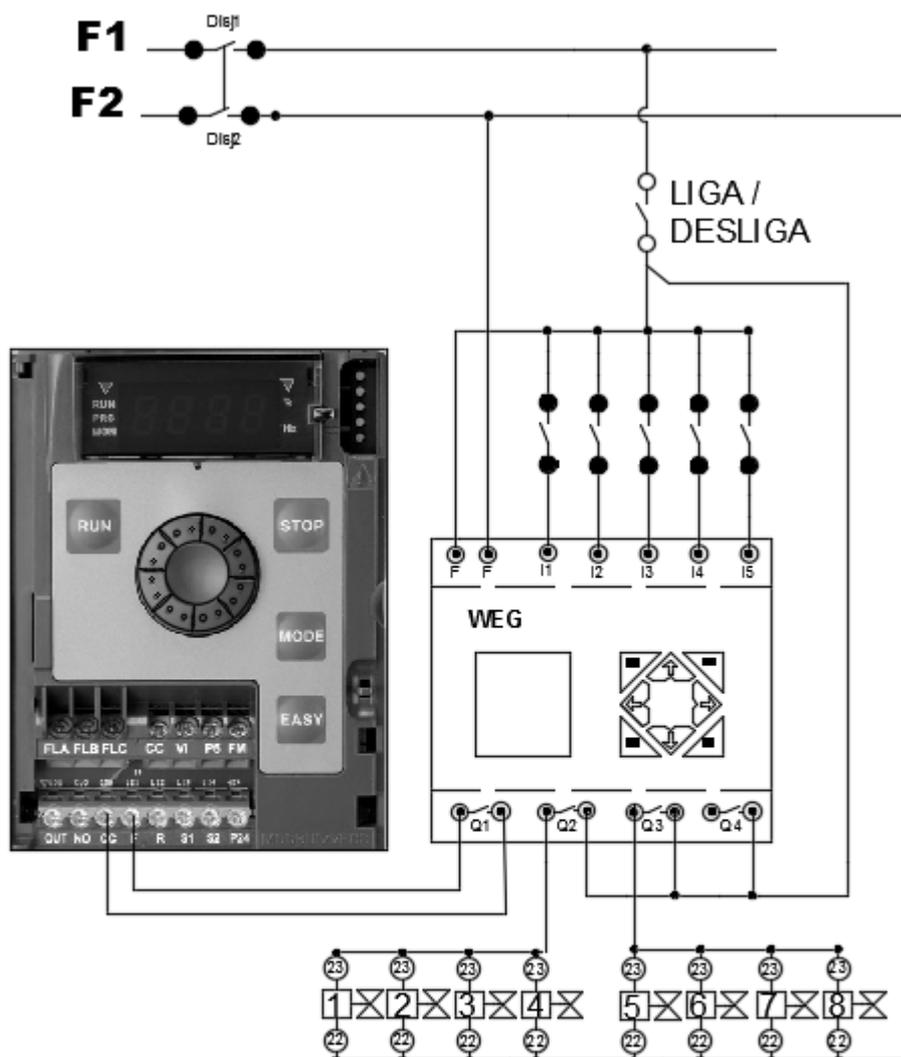


## Anexo C: Posição angular final do rastreador solar



Anexo D: Esquema elétrico do rastreador solar.

## Esquema Elétrico do Rastreador Solar



**I1= Liga / Desliga**  
**I2= Fim-de-curso 1**  
**I3= Fim-de-curso 2**  
**I4= Liga manual sentido horário**  
**I5= Liga manual sentido anti-horário**  
**Q1= Aciona o Inversor de frequência**  
**Q2= Libera válvula sentido horário**  
**Q3= Libera válvula sentido anti-horário**  
**Válvulas 1 a 4 = Libera o fluxo no sentido horário**  
**Válvulas 5 a 8 = Libera o fluxo no sentido anti-horário**

## Anexo E: Programação do Rastreador Solar.

